



Universidad
Carlos III de Madrid

PROYECTO FIN DE CARRERA

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE TIPO EULERIANA- EULERIANA DE UN LECHO FLUIDO BIDIMENSIONAL PARA LA DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE BURBUJAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL, ESPECIALIDAD MECÁNICA

Autor: JAVIER REINA GONZÁLEZ

Tutor: FERNANDO HERNÁNDEZ JIMÉNEZ

Leganés, febrero de 2011





Agradecimientos

Agradezco a mi familia y a mi pareja que me han apoyado durante todo el tiempo que he empleado en mis estudios universitarios y en realizar el trabajo, y a mi tutor Fernando por su paciencia y ayuda cuando la necesitaba.

ÍNDICE

	<u>Página</u>
1. Introducción	6
1.1. Resumen	7
2. Objetivo del proyecto	8
3. Introducción a fluidización y lechos fluidos	9
3.1. Definición de lecho fluido	9
3.2. El fenómeno de la fluidización	10
3.3. Comportamiento de un lecho fluido	13
3.4. Ventajas e inconvenientes de aplicación industrial de lechos fluidos	14
3.5. Aplicaciones industriales	16
3.5.1. Operaciones físicas	16
3.5.1.1. Intercambio de calor	16
3.5.1.2. Recubrimiento de objetos metálicos	17
3.5.1.3. Adsorción	17
3.5.1.4. Secado de sólidos	18
3.5.2. Reacciones de síntesis	18
3.5.3. Craqueo de hidrocarburos	19
3.5.3.1. Craqueo catalítico fluido (FCC)	20
3.5.3.2. Craqueo térmico	20
3.5.4. Combustión e incineración	21
3.5.4.1. Combustión de carbón	21
3.5.4.2. Incineración	22
3.5.5. Gasificación	22
3.5.5.1. Gasificación de carbón	22
3.5.5.2. Gasificación de residuos sólidos	23
3.5.6. Activación de carbón	23
3.5.7. Calcinación	23
3.5.8. Reacciones con sólidos	24
3.5.9. Biofluidización	24
3.6. Fundamentos teóricos de la fluidización	25
3.6.1. Pérdida de carga	25
3.6.2. Velocidad mínima de fluidización	28
3.6.3. Presión y temperatura del lecho fluido	30
3.7. Caracterización de partículas	31
3.7.1. Clasificación de las partículas de fluidización	31
3.7.2. Propiedades de las partículas de fluidización	32
3.7.3. Aglomeración de partículas a altas temperaturas	33
3.8. Burbujas en lechos fluidos	35
3.8.1. Patrón de flujo de fluidización en burbujas	35
3.8.2. Formación y crecimiento de burbujas	36
3.8.3. Tamaño y velocidad de la burbuja	37



3.8.4. Expansión del lecho	39
3.8.5. Esfericidad y porosidad del lecho	39
4. Metodología	41
4.1. Simulación de lechos fluidos mediante técnicas de CFD	41
4.2. Introducción teórica del modelo Euleriano-Euleriano	41
4.3. Ecuaciones	44
4.3.1. Ecuaciones de conservación para flujos granulares	44
4.3.2. Modelos semiempíricos de cierre de las ecuaciones	44
5. Instalación simulada	48
5.1. Modelo físico y dominio computacional	48
5.2. Características de la malla	50
5.3. Descripción de los casos	52
5.4. Análisis del código MATLAB para la detección de burbujas	54
6. Resultados obtenidos	56
6.1. Análisis de gráficas	56
6.2. Comparación de resultados	77
7. Conclusiones	81
8. Trabajos futuros	83
9. Referencias	84
10. Índice de tablas y figuras	86
11. Anexos: Código MATLAB	88

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de lechos fluidos es un campo de continuo desarrollo y amplio rango de aplicación en el sector ingenieril y en el industrial en particular. Actualmente, dichas aplicaciones se centran en la mejora y control de diferentes procesos de carácter industrial.

Algunos procesos como las combustiones, los procesos de gasificación de los combustibles y el control de reacciones químicas son algunas de las principales ramas en las que los lechos fluidos pueden utilizarse para mejorar la eficiencia de los procesos industriales. Estas aplicaciones anteriores junto a las de secado, adsorción o el craqueado de petróleo son de principal aplicación en la actualidad y sus características, se estudian posteriormente e indican además una ampliación de su uso en el futuro.

A pesar de su aplicación generalizada, gran parte del desarrollo y diseño de reactores de lechos fluidizados ha sido empírico ya que el complejo comportamiento del flujo formado por gas-sólido que se encuentra en estos sistemas hace que el modelado sea una tarea difícil. El problema fundamental reside en la modelización hidrodinámica del lecho fluidizado ya que la interfase entre el gas y la fase densa es transitoria y desconocida y los fenómenos de interacción entre fases son conocidos sólo para un rango muy limitado de condiciones. El primer paso para resolver la mezcla de dos fases es tratar a cada fase mediante la mecánica de medios continuos estándar con los límites y condiciones de salto para resolver las ecuaciones que rigen la interfase. Sin embargo, la complejidad matemática de las ecuaciones no lineales y, en particular las condiciones de movimiento, hacen que la resolución numérica sea muy compleja. Con el advenimiento de un aumento de las capacidades de cómputo, la dinámica de fluidos computacional, CFD (Computational Fluid Dynamics), ha cobrado gran importancia como herramienta para las modelaciones hidrodinámicas. Si bien es ahora una herramienta estándar para los flujos de fase única, es en el desarrollo de fases de sistemas multifásicos, tales como lechos fluidizados, donde reside el interés.

Cabe destacar que en los estudios hidrodinámicos de lechos fluidizados se suelen emplear modelos de dos dimensiones en dominios rectangulares (columnas) para poder estudiar el comportamiento que ofrecen las burbujas y las distintas características de la fluidización. Por tanto, en este estudio la simulación llevada a cabo ha sido a través de una morfología 2D con sus resultados correspondientes.

En el presente proyecto se realiza un recorrido en el análisis de la fluidización teórica en general y de los casos simulados en particular del siguiente modo: se procede a introducir de forma teórica los lechos fluidizados para comprender de mejor manera el funcionamiento de los casos simulados, después se presentan los casos simulados y todos sus resultados para, posteriormente, pasar a comentarlos y así resumir sus características y similitudes.

1.1. Resumen

El presente estudio se ha centrado en analizar ocho casos distintos en la simulación de un lecho fluido multifásico aire-sólido en régimen burbujeante del tipo Euleriano-Euleriano y contenido en una columna o tanque, en el que variarán el modelo empleado, además de factores como la velocidad de inyección de aire en función de una velocidad de mínima fluidización establecida (a partir de la cual el lecho comienza a fluidizar) y de la altura de lecho fluidizado; a razón de analizar su comportamiento y determinar el diámetro y velocidad de las burbujas formadas en el lecho fluidizado en función de la altura y así comparar los distintos resultados obtenidos y valorar sus posibles errores o concordancias.

Para conseguir los resultados se han empleado las herramientas de software basadas en CFD, FLUENT para la modelización y resolución del sistema planteado, y GAMBIT, para llevar a cabo el planteamiento geométrico de la columna 2D. Finalmente se ha requerido el uso del programa matemático MATLAB con el fin de obtener distintas gráficas para el análisis del comportamiento de las burbujas. El sistema sobre el que se ha trabajado es un lecho bidimensional que varía de altura según el caso, dentro de una columna cilíndrica de altura dos metros y anchura medio.

2. OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo primordial del presente proyecto se puede resumir en los siguientes puntos:

- Introducción del alumno en el uso de programas de simulación CFD utilizando la versión comercial FLUENT disponible en las aulas informáticas de la Universidad Carlos III de Madrid, mediante la reproducción y comparación de estudios realizados por otros autores.
- Desarrollo e investigación de ocho casos distintos para modelos de Syamlal-O'Brien y Gidaspow con la introducción de distintos valores de velocidad del fluido gas en la columna y altura de lecho fluido, para el análisis del comportamiento de los mismos en estado de fluidización para modelos multifásicos durante una simulación de diez segundos.
- Análisis de todos los resultados obtenidos mediante el programa matemático de simulación MATLAB, disponible también en la UC3M con el fin de comparar los distintos casos en base a sus distintos parámetros, establecer qué concordancias y anomalías existen entre ellos y aportar así un estudio directo de la influencia de variar distintos factores en la simulación de lechos fluidos.



3. INTRODUCCIÓN A FLUIDIZACIÓN Y LECHOS FLUIDOS

3.1. Definición de lecho fluido

La fluidización es un proceso por el cual partículas sólidas son llevadas a un estado fluido mediante suspensión en un gas o un líquido. Este método de contacto tiene unas propiedades poco usuales que hace que sean objeto de estudio con el fin de conocer las aplicaciones industriales en las que puede resultar útil.

Las características del flujo que pasa a través de las partículas sólidas del lecho serán determinantes para controlar el comportamiento del mismo y distinguir diferentes regímenes de funcionamiento que veremos en este capítulo.

3.2. El fenómeno de la fluidización

Para explicarlo de forma sencilla, imaginamos un lecho de partículas sólidas dentro de un cilindro vertical e inyectamos aire a una cierta velocidad por la parte inferior de dicho cilindro.

Si el fluido asciende a través de una fina película de partículas con un caudal bajo, éste se filtra por los huecos que existen entre las partículas, que permanecen estacionarias. Es lo que se conoce como *lecho fijo* (Figura 1(a)).

Sin embargo, si incrementamos el caudal las partículas se separan, vibran y colisionan entre ellas formando lo que se conoce como *lecho en comienzo de fluidización* (Figura 1(b)).

Si seguimos aumentando la velocidad, se llega a un punto en el que las partículas comienzan a suspenderse arrastradas por el fluido en ascensión. En este punto las fuerzas de fricción entre las partículas y el fluido compensan el peso de las mismas, la componente vertical de las fuerzas de presión debidas a las partículas que se encuentran por encima de ellas desaparece y la caída de presión en cualquier sección del lecho iguala al peso del fluido y las partículas en dicha sección. Por lo cual, el lecho se encuentra en un estado de *mínima fluidización* (Figura 1(c)).

En general, los sistemas gas-sólido, de uso en el presente proyecto, se comportan de forma muy similar al sobrepasar el caudal de mínima fluidización; se observan grandes inestabilidades con aparición de burbujas y canales. Además, el lecho no se expande mucho más de su volumen de mínima fluidización. Este tipo de situación se conoce como *lecho fluido heterogéneo* o *lecho fluido burbujeante* (Figura 1(d)). Debido a este efecto en el interior del lecho aparece un movimiento cíclico de las partículas que dependen y serán controladas por la morfología de los inyectores de gas y la propia geometría del lecho. En casos excepcionales de sólidos de muy elevada densidad fluidizados por líquidos de baja densidad también se puede observar este comportamiento burbujeante.

Muchos investigadores han presentado modelos para definir la morfología y comportamiento de las burbujas de forma cuantitativa y describir parámetros como porosidad, diámetro de burbuja, etc., pero de este asunto nos ocuparemos más adelante.

Las burbujas de gas al ascender por el lecho crecen y se produce la coalescencia de las mismas. En ocasiones, en lechos de gran longitud y pequeño diámetro las burbujas pueden llegar a ser tan grandes como el propio diámetro de la columna que contiene el lecho. Este fenómeno se denomina *slugging* y las burbujas se llaman slugs. Este efecto produce variaciones en la presión del lecho y se puede evitar o modificar mediante el uso de placas agujereadas para la inyección del fluido, impidiendo así que la burbuja formada ocupe toda la sección del lecho.

Si se utilizan partículas finas, éstas caen suavemente hacia abajo rodeando las burbujas por lo que se producen burbujas de mayor tamaño; fenómeno que se conoce por el nombre de *slugging con slugs axiales* (Figura 1(e)). En el caso de partículas mayores, la fracción de lecho por encima de las burbujas es empujada hacia arriba como un pistón y las partículas caen en forma de lluvia hasta que la burbuja finalmente se desintegra. Este comportamiento se denomina *slugging con slugs de pared* (Figura 1(f)).

Para poder llegar a controlar el fenómeno de *slugging* es importante conocer la velocidad mínima a partir de la cual se produce dicho fenómeno, que como podemos comprobar es función del diámetro de la partícula:

$$\mu_s = \mu_{mf} + 0.07\sqrt{gD} \quad (2.1.)$$

Si aumentamos la velocidad del gas considerablemente podemos llegar a superar el valor de la velocidad terminal de las partículas, por lo que se produce un mayor porcentaje de burbujas que se unen entre sí y pueden generar otras de mayor tamaño; pudiendo llegar al punto de formarse aglomerados de partículas que son proyectados fuera del lecho, desapareciendo la superficie superior del mismo debido a un arrastre de las partículas. En este régimen denominado *lecho fluidizado turbulento* (Figura 1(g)) se observa un movimiento de forma turbulenta de sólidos y burbujas de diferentes tamaños. Cabe destacar que no todos los lechos en régimen burbujeante pueden pasar a un estado de régimen turbulento con el aumento de la presión de inyección, puesto que también influyen factores geométricos del lecho y los propios de las partículas.

Para un aumento de velocidad del gas aún mayor, las partículas son transportadas de forma neumática por el lecho expulsándolas fuera del mismo. Este estado se conoce como *lecho fluidizado disperso* (Figura 1(h)).

En los sistemas gas-sólido puede producirse un chorro de gas que se abra paso por el lecho; éste fenómeno se denomina *lecho de chorro*. Si el gas se inyecta a elevada velocidad, penetra a través del lecho de partículas transportando así algunas de ellas hasta la parte superior del mismo.

Los lechos fluidizados de contacto gas-sólido tienen algunas propiedades características y de gran utilidad. Sin embargo, para el caso de lechos fluidizados líquido-sólido la utilidad es menor por razones asociadas a su comportamiento, por lo que hasta ahora las aplicaciones industriales más importantes están basadas en sistemas gas-sólido.

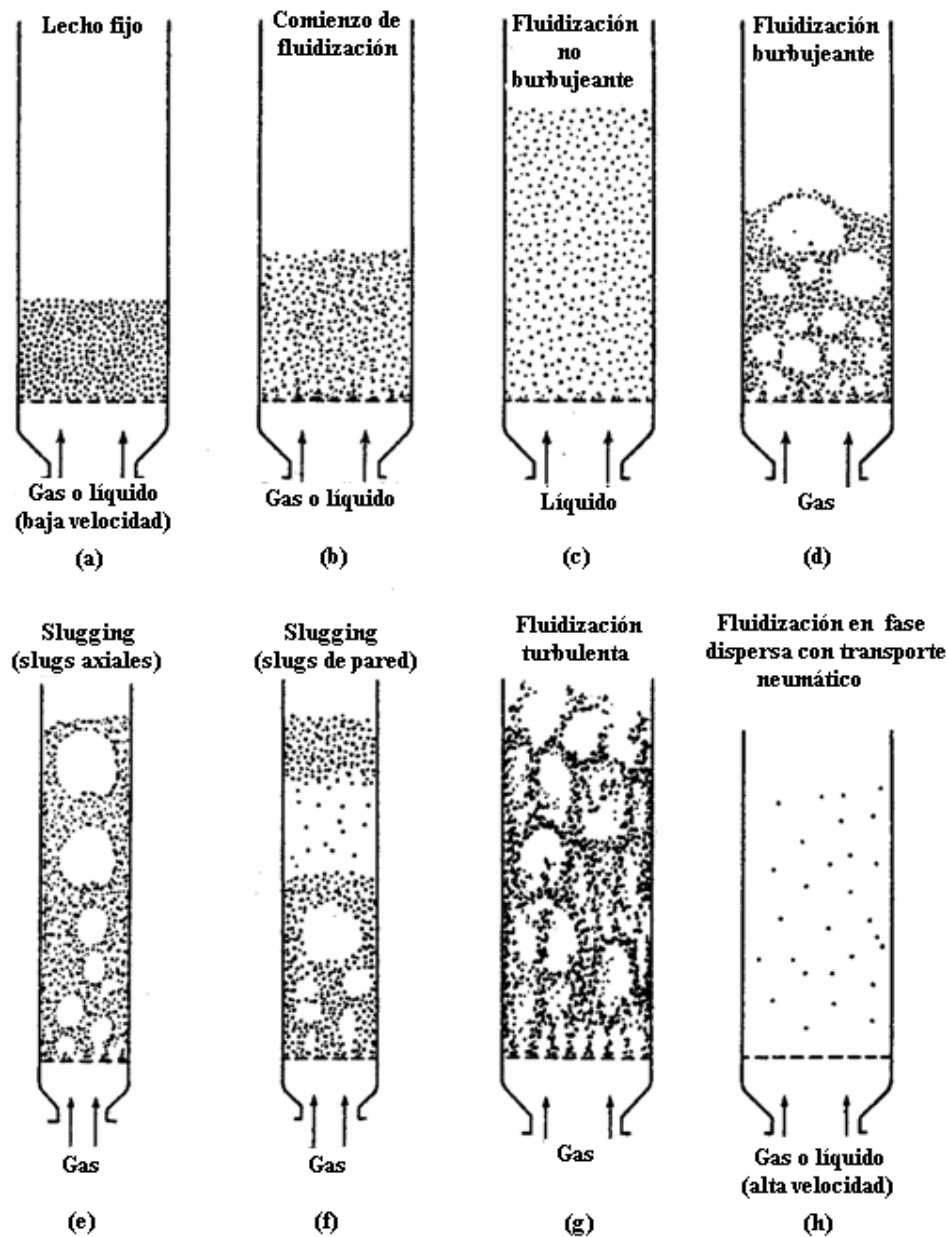


Figura 1. Distintos modos de contacto entre el lecho de partículas y el fluido: (a) Lecho fijo; (b) Lecho en comienzo de fluidización; (c) Lecho con fluidización no burbujeante; (d) Lecho con fluidización burbujeante; (e) Slugging con slugs axiales; (f) Slugging con slugs de pared; (g) Fluidización turbulenta; (h) Fluidización en fase dispersa con transporte neumático de partículas.

3.3. Comportamiento de un lecho fluido

La fase densa de un lecho fluidizado presenta características muy similares en relación a su comportamiento con un líquido. A continuación se describen ciertos comportamientos en lechos semejantes al de los líquidos.

Si introducimos un objeto de poca densidad en el lecho aparece inmediatamente en la superficie y flota. De forma contraria, si el objeto es de mayor densidad se hunde rápidamente.

Si el recipiente se inclina, el lecho iguala el nivel de la superficie y permanece horizontal.

En el caso de realizar un orificio en el recipiente que contiene el lecho, éste sale en forma de chorro.

Incluso, la diferencia de presión entre dos puntos del lecho es proporcional a la diferencia de altura entre ellos y prácticamente igual a la diferencia de presión estática. Por tanto, podemos afirmar que en el caso de tener dos lechos fluidizados comunicados entre sí, se iguala el nivel de ambos.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente se pueden diseñar aplicaciones industriales atendiendo a las propiedades que presentan los lechos fluidos, así como el tipo de contacto.

3.4. Ventajas e inconvenientes de aplicación industrial de lechos fluidos

Las propiedades que presentan los lechos fluidos permiten su uso en aplicaciones industriales. A parte de las características especiales que les hacen útiles para determinadas aplicaciones y que pueden considerarse ventajas, también existen ciertas desventajas, que en este capítulo procedemos a enumerar:

Sus principales ventajas son:

1. La elevada capacidad de mezclado permite una mayor homogeneidad de propiedades en su interior.
2. La semejanza en comportamiento con los líquidos hace que su manejo pueda automatizarse y controlarse fácilmente.
3. Gracias a la rapidez con la que se mezclan los sólidos, que hace que se alcance rápidamente un estado isoterma, las operaciones pueden ser controladas de una manera sencilla y fiable.
4. Una adecuada mezcla de los sólidos proporciona gran resistencia a cambios bruscos de temperatura, responde lentamente a cambios bruscos en las condiciones de funcionamiento y garantiza un amplio margen de seguridad en las reacciones muy exotérmicas.
5. La circulación de partículas entre dos lechos fluidos hace posible la adición o extracción de la cantidad necesaria en cada momento.
6. Los lechos fluidos se pueden utilizar en operaciones de gran tamaño.
7. Un enorme área de contacto entre sólido y fluido (un metro cúbico de partículas con un diámetro de 100 micras, tiene un área superficial mayor a treinta mil metros cuadrados) es capaz de alcanzar elevadas velocidades de transferencia de calor y masa entre el sólido y el fluido.
8. La capacidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inmerso en su interior es alta; por tanto, los intercambiadores de calor en lechos fluidizados requieren una superficie de transferencia relativamente baja.

Sin embargo, los principales inconvenientes son:

1. La presencia de burbujas en lechos burbujeantes produce una mezcla entre la fase densa y el gas, lo que se convierte en algo crítico cuando se requieren productos intermedios en procesos de transformación de gases.
2. El rápido mezclado de las partículas provoca tiempos de residencia no uniformes, por lo que los productos obtenidos son heterogéneos y de bajo rendimiento.
3. La erosión en diferentes componentes debido a la abrasión producida por las partículas puede ser importante.
4. En operaciones no catalíticas a alta temperatura, la aglomeración y sinterización de partículas finas requerirá disminuir la temperatura de trabajo, reduciéndose el rendimiento drásticamente.

5. Las velocidades operacionales para que un lecho sea fluidizado están limitadas en un rango.
6. El tamaño de las partículas que pueden ser fluidizadas tiene un cierto límite que es dependiente de factores como son la viscosidad del fluido, la velocidad del flujo y la razón de densidad de la partícula y el fluido.

El factor principal para la aplicación en industria de los lechos fluidizados es el menor coste de operación pero el éxito reside en entender y minimizar las desventajas.

Algunas ventajas de la investigación sobre lechos fluidizados son:

1. Gracias a pequeñas mejoras en conversión y/o producción puede incrementar las ganancias en cientos de millones de dólares en todo el mundo.
2. Cuando la composición de la producción sea modificada se alcanzará una mejor operación de los equipos existentes. El funcionamiento de nuevas unidades que sean más pequeñas, más largas o simplemente un poco diferentes en su diseño puede provocar ciertas mejoras en el proceso.
3. Con la investigación de diferentes procesos a los ya existentes se podrían crear más aplicaciones prácticas.

3.5. Aplicaciones industriales

El proceso de fluidización ya era utilizado desde el siglo diecisiete en la extracción de materiales. Sin embargo, el proceso no tuvo su desarrollo comercial hasta los inicios de la década de 1940 con la gasificación del carbón y se fueron desarrollando una serie de procesos relacionados con el petróleo, lo cual originó una disminución en los costos de producción.

Se fueron desarrollando diversos tipos de lechos fluidos con el paso de los años pero no fue hasta 1967 cuando una importante investigación realizada por Geldart irrumpió en el ámbito industrial. Después de esto, se desarrolló una investigación más completa por Squires, a quién se le atribuye la creación y desarrollo de los procesos relacionados con lechos fluidos desde 1946.

En el siguiente apartado realizamos un repaso de las distintas aplicaciones de carácter industrial de lechos fluidos. Podemos dividirlos en operaciones físicas, reacciones de síntesis, craqueo de hidrocarburos, combustión, carbonización y gasificación, calcinación, reacciones en sólidos y biofluidización.

3.5.1. Operaciones físicas

3.5.1.1. Intercambio de calor

Los lechos fluidizados presentan una gran capacidad para transferir el calor y mantener uniforme la temperatura de operación, por lo que se emplean como intercambiadores de calor. También se emplean para obtener ciertas propiedades determinadas en aplicaciones de enfriamiento de metales o aleaciones rápidamente. De hecho, el intercambio puede realizarse sin contacto entre las partículas y el gas de refrigeración circulante por los tubos dentro del lecho fluidizado. Una aplicación basada en esta idea consiste en hacer circular agua a través de tubos sumergidos en un lecho fluidizado de partículas a alta temperatura recuperando el calor para producir vapor (figura 2).

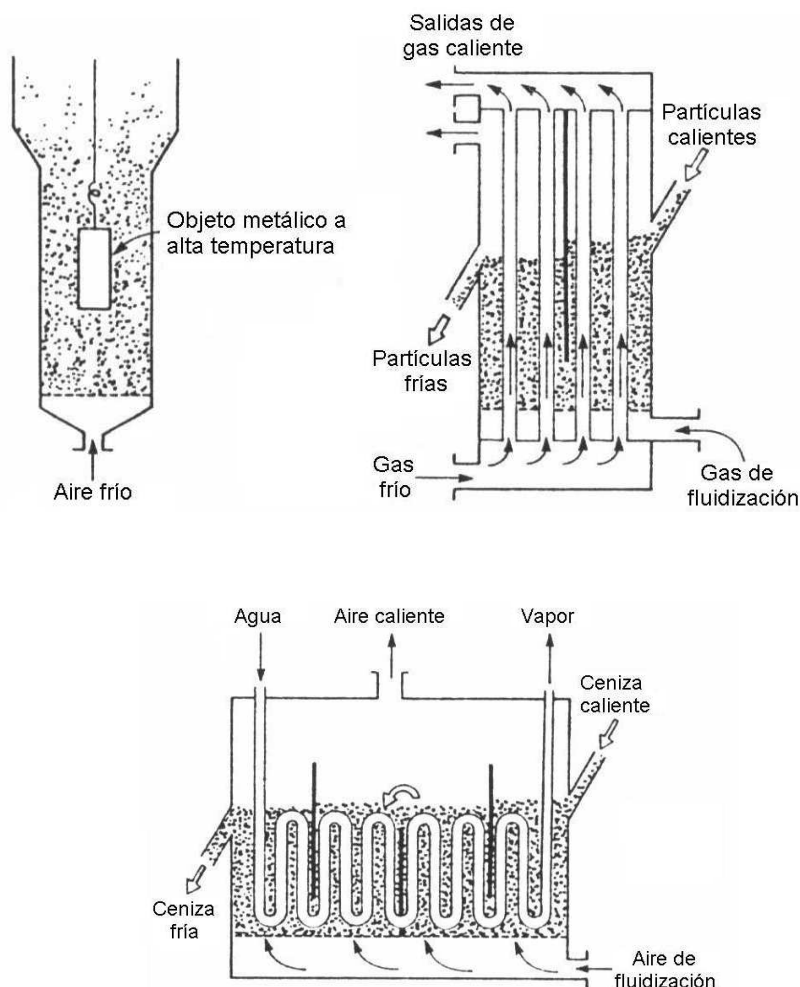


Figura 2. Ejemplos de intercambiadores de calor en lecho fluidizado: (a) Enfriamiento rápido de metales; (b) intercambio de calor indirecto entre gas y partículas; (c) Generación de vapor a partir de ceniza caliente.

3.5.1.2. Recubrimiento de objetos metálicos

También pueden realizarse recubrimientos plásticos en objetos metálicos de la siguiente forma: se fluidizan partículas finas del material plástico que deseamos emplear mediante aire, se sumerge el objeto a recubrir a una temperatura superior al punto de fusión del plástico durante un periodo corto de tiempo y finalmente se obtiene una fina capa de recubrimiento debido a la adhesión de las partículas fundidas sobre la superficie del metal.

3.5.1.3. Adsorción

Los procesos continuos de adsorción de lechos fluidizados mediante múltiples etapas se suelen emplear para eliminar componentes muy diluidos en grandes flujos de gas. Estos componentes se adsorben periódicamente con partículas de carbón activo y después se eliminan con vapor. Algunos ejemplos de esta aplicación pueden ser la retirada y concentración de

solventes como disulfuro de carbono, acetona, etanol y acetato de etilo, y la eliminación de trazas contaminantes en gases residuales.

3.5.1.4. Secado de sólidos

En el ámbito comercial los secadores de sólidos se emplean para el secado de cualquier tipo de sólido húmedo, siempre que presente la capacidad de ser fluidizado por un gas caliente. Algunos de esos sólidos son minerales, arena, polímeros, productos farmacéuticos y fertilizantes. Estas numerosas aplicaciones se deben a que presentan una gran capacidad, bajo coste de construcción, elevada eficiencia térmica y sencillez en su operación.

En el secado de sólidos es tarea primordial controlar el tiempo que éstos deben permanecer en el lecho, debido a que en ciertos casos se necesita tiempos de secado iguales para todas las partículas. Por este motivo, se presentan distintos tipos de diseño, desde lechos simples o lechos multietapa a lechos fluidizados en fase dispersa o líneas de transporte neumático.

Normalmente el secado se lleva a cabo mediante fluidización con aire caliente. Incluso algunos sólidos pueden presentar cierto riesgo de explosión debido a que pueden contener ciertas cantidades de disolventes como metanol o tolueno. Por ello, éstos sólidos se fluidizan con gas inerte, vapor de agua o el propio vapor del disolvente en cuestión para su posterior secado mediante un intercambiador de tubos en un sistema cerrado.

También se utilizan lechos fluidizados vibratorios debido a que algunos sólidos ofrecen tendencia a apelmazarse. En ellos el distribuidor de aire caliente vibra de modo que evita que las partículas se aglomeren pero permite su fluidización sin problemas.

3.5.2. Reacciones de síntesis

Los lechos fluidizados son más adecuados que los lechos fijos para el desarrollo de reacciones en fase gas con catalizadores sólidos debido a la necesidad de mantener un control estricto de la temperatura en la zona donde se produce la reacción. Esto se justifica por diversas razones como que la reacción puede ser explosiva fuera de un estrecho rango de temperaturas, la obtención de los productos es dependiente de la temperatura de operación, la concentración de altas temperaturas en el catalizador puede conducir a un rápido deterioro o al difícil control de la temperatura debido a que las reacciones son exotérmicas.

Utilizando lechos fijos se hace difícil alcanzar el control de temperatura necesaria debido a que los gases presentan malos coeficientes de transferencia de calor y valores muy bajos de capacidad calorífica, comparados con sus calores de reacción. Por todo ello, se obtiene de forma más sencilla con lechos fluidizados debido a una distribución de calor más eficiente, además de que ayuda a eliminar las posibles zonas con altas concentraciones de calor, ya que ofrece una rápida circulación de partículas con capacidad calorífica relativamente alta.

Algunos ejemplos de reacciones de síntesis mediante procesos de fluidización son:

- En lecho fluidizado de partículas finas: anhídrido ftálico, acetato de vinilo, acrilonitrilo, dicloruro de etileno, clorometano, anhídrido maleico, o-cresol y 2,6-xilenol.
- En lecho fluidizado rápido: síntesis de Fischer-Tropsch.
- En lecho fluidizado burbujeante de partículas gruesas: polietileno y polipropileno.

3.5.3. Craqueo de hidrocarburos

La rotura catalítica de hidrocarburos en elementos de menor peso molecular, mediante las denominadas reacciones de craqueo, presenta dos características fundamentales: las reacciones son endotérmicas y en la superficie de los sólidos cercanos se produce deposición. El tipo de proceso que se utiliza industrialmente para estas reacciones se debe a las características enunciadas anteriormente, además de las grandes cantidades de material a tratar.

Principalmente, estos procesos se dividen en dos módulos: la absorción, donde se produce la reacción y deposición del carbono; y la quema del carbono depositado y recuperación de calor. Este calor recuperado se devuelve al primer módulo para alimentar la reacción mediante las propias partículas en recirculación. La única forma en que esto se puede desarrollar de manera eficiente es con un sistema de circulación de partículas mediante uno o más lechos fluidizados. Todos los procesos de craqueo se realizan en la actualidad con este tipo de operación.

Existen dos tipos de craqueo catalítico: el craqueo catalítico fluido y el craqueo catalítico térmico que describiremos brevemente a continuación:

3.5.3.1. Craqueo catalítico fluido (FCC)

Los hidrocarburos en fase vapor se dividen en elementos de menor peso molecular en contacto con el catalizador adecuado. Para desarrollar el proceso con éxito la forma en que se suministra la gran cantidad de calor necesaria para la reacción endotérmica y la manera de regenerar las partículas catalizadoras rápidamente y con efectividad resulta clave. El FCC o “fluid catalytic cracking” realiza a la vez la regeneración de las partículas catalizadoras y del calor de reacción. Por ello, el proceso FCC es el proceso más aplicado en el craqueo de hidrocarburos.

La característica fundamental del proceso FCC es la unión de las dos unidades: en primer lugar, se dispone de un reactor a una temperatura entre 480°C y 540°C, donde el petróleo suministrado en fase vapor se fragmenta en contacto con las partículas catalizadoras a alta temperatura. Después de un determinado tiempo de residencia, las partículas se envían al regenerador que se encuentra a una temperatura aproximada de 580°C y allí los depósitos de carbono se queman y se reducen desde el 1-2% hasta el 0.4-0.8%. Después de unos cinco o diez minutos las partículas calientes son devueltas al reactor.

Tras la primera unidad FCC utilizada con éxito en el ámbito industrial se han desarrollado diferentes diseños pero el fundamento en todos ellos son los mismos e implican el empleo de lechos fluidizados.

3.5.3.2. Craqueo térmico

El proceso de craqueo térmico más empleado es el de producción de etileno y propileno a partir de la fragmentación de nafta procedente del petróleo, mediante reacciones altamente endotérmicas.

Aunque se han desarrollado procesos con sistemas de un solo lecho fluidizado, los procesos de mayor éxito son los de dos lechos con recirculación de partículas, como el de Kunii-Kunugi (ver Figura 3). Este proceso se basa en la fluidización en fase densa con el fin de prevenir el atasco de los conductos de transporte. La producción se hace a una temperatura aproximada de 750° C con partículas de coque, que circulan entre el reactor y el regenerador.

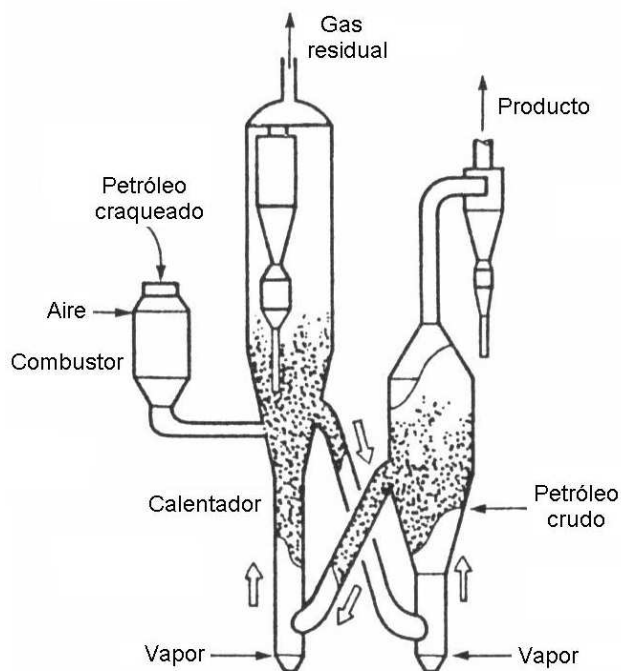


Figura 3. *Proceso Kunii-Kunugi*

3.5.4. Combustión e incineración

3.5.4.1. Combustión de carbón

La combustión de lecho fluidizado (FBC, del inglés fluidized bed combustion) comenzó a desarrollarse a comienzos de los años 1970s por varias potencias tecnológicas debido a la crisis del petróleo que acometía en esa época. Como alternativa al petróleo, se perseguía alcanzar una forma óptima de combustión del carbón de baja calidad y combustibles que no se pudieran quemar en calderas convencionales.

Uno de los primeros diseños realizados fue el basado en un lecho burbujeante a presión atmosférica, donde se fluidiza en primer lugar un lecho de partículas de caliza o dolomita mediante aire para después, inyectar pequeñas partículas de carbón. Las partículas, que suelen contener carbono sin quemar, pueden ser atrapadas y quemadas en celdas diseñadas para tal fin o devueltas al lecho por medio de ciclones.

Estas partículas capturan mejor los componentes de azufre si el lecho de mantiene aproximadamente a unos 850 °C, por lo que los intercambiadores de calor suelen ir en el propio lecho; y para mejorar el rendimiento del

proceso se instalan intercambiadores en las paredes del lecho y en la sección de salida de gases.

Los lechos fluidizados reducen las emisiones de NO_x y SO_x porque trabajan a menor temperatura.

Existen diferentes diseños al mencionado anteriormente que han sido desarrollados comercialmente, en pequeña y gran escala, y a presión atmosférica o alta presión.

3.5.4.2. Incineración

Los incineradores de lecho fluido permiten quemar de forma eficiente combustibles de bajo poder calorífico y alto contenido en cenizas, como el caso de residuos sólidos; cuya incineración por medio de quemadores de parrilla es problemática en cuanto a la emisión de fuertes olores. Lo cual supone una ventaja en el uso de incineradores de lecho fluido.

En el proceso, se retiran los elementos metálicos y después se trituran los residuos y se fluidiza el resultado en el incinerador. La temperatura alcanzada por el lecho es de $800 - 900^\circ\text{C}$, por lo que los elementos orgánicos se descomponen y queman. La ceniza se elimina por la parte inferior del lecho y los sólidos se queman por completo.

Para mejorar la eficiencia de estos sistemas se debe realizar un tratamiento posterior de residuos para eliminar los materiales inorgánicos, además de emplear filtros adecuados para mejorar la calidad de las emisiones.

3.5.5. Gasificación

3.5.5.1. Gasificación de carbón

Tras la abundancia en el uso del petróleo y gas natural de los años 1950s se llegó a una etapa en 1970s en que empezó la crisis y volvió a utilizarse el carbón.

En este proceso de gasificación se quema el carbón con aporte mínimo de oxígeno. El objetivo es eliminar partículas y otras impurezas del combustible sólido convirtiéndolo en gas, para poder utilizarlo en sistemas de combustión exigentes en lo que a la calidad del combustible se refiere. El producto sólido obtenido está formado por cenizas y residuos carbonosos.

El proceso de gasificación se puede llevar a cabo por distintos agentes como el aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno, y de ellos depende el contenido energético del gas resultante.

Se han llevado a cabo multitud de diseños sobre gasificadores de carbón en lecho fluido, desde procesos con un solo lecho hasta procesos de múltiples lechos, con recirculación, operando a alta presión y fluidizados con diferentes agentes.

3.5.5.2. Gasificación de residuos sólidos

En las plantas de incineración de residuos sólidos urbanos se necesita instalar equipos de limpieza de gases de escape debido a que en ocasiones, los residuos sólidos urbanos contienen materiales tóxicos y peligrosos. Sin embargo, en las plantas de gasificación, la limpieza asociada a los gases de combustión resulta más simple y barata porque el volumen de gas producido es menor que en las incineradoras, resultando el tratamiento de residuos sólidos mucho más ventajoso.

3.5.6. Activación de carbón

Este proceso sirve para obtener carbón activado, cuyos usos frecuentes son como catalizador, para la adsorción de contaminantes en corrientes gaseosas y líquidas, para la separación de sustancias orgánicas y en la recuperación de solventes. Como materia prima se emplea carbón, madera u otros residuos residuales como podría ser la cáscara de coco.

El proceso se divide en dos fases distintas: en la primera se carbonizan los sólidos precursores para formar un esqueleto carbonoso, eliminando elementos como H_2 y O_2 ; y después, se procede a la gasificación o activación del carbonizado, donde éste se fluidiza con un agente oxidante (aire, agua, vapor de agua o combinación de éstos) para eliminar los átomos de carbono, aumentando así el volumen de poros y la superficie específica.

3.5.7. Calcinación

En un lecho fluidizado se pueden calcinar fácilmente partículas de caliza y dolomita quemando directamente combustible en el lecho. Esto supone un elevado derroche de combustible debido al carácter altamente endotérmico de la reacción. Se suelen emplear sistemas multietapa con el fin de recuperar gran parte del calor, donde el material bruto se introduce por la etapa superior y va cayendo de etapa en etapa. En la etapa de calcinación se inyecta el combustible, donde se mezcla con el aire de fluidización y quema las partículas de material. El calor residual asciende por las etapas superiores aumentando la temperatura de las partículas, mientras que los restos ya calcinados abandonan el lecho por la parte inferior.



3.5.8. Reacciones con sólidos

Con objetivo de modificar las características de ciertos minerales, se emplean lechos fluidizados para realizar distintas reacciones que describiremos a continuación:

Una de ellas es la tostación de sulfuros de mineral para obtener metales. La oxidación producida es levemente exotérmica, por lo que se emplean normalmente lechos fluidizados de una sola etapa sin evacuación de calor o con una ligera refrigeración. Debido a ese menor exceso de aire se obtienen gases de escape de alta concentración de dióxido de azufre, que tendrán que ser tratados de forma pertinente.

La producción de silicio de elevada pureza es otra de las utilidades de lechos fluidizados; en este caso, para la fabricación de semiconductores y células solares.

También se emplean los lechos en la cloración o fluoración de óxidos de metal para obtener metal puro. La obtención de silicio puro a partir de silicio metalúrgico se lleva a cabo a través de diversos pasos sobre los que se han desarrollado diferentes unidades de lecho fluidizado.

La reducción de óxidos de hierro es considerado también como otro desarrollo de los lechos fluidos, con el fin de producir hierro y acero a partir de partículas de mineral de alto grado.

3.5.9. Biofluidización

Podríamos destacar el cultivo de microorganismos como la aplicación más peculiar de fluidización. Además resulta más ventajoso el cultivo en lechos fluidizados que el cultivo convencional por diversos motivos como la fácil transferencia de oxígeno (lo que activa el metabolismo), la mayor efectividad en el crecimiento de la superficie de los microorganismos, la eficiencia en la eliminación del calor y CO₂ generado y por la facilidad para controlar la temperatura, humedad y PH.

3.6. Fundamentos teóricos de la fluidización

A continuación se plantean teóricamente algunos aspectos fundamentales en lechos fluidos: el de la pérdida de carga o presión en el lecho, el de la velocidad mínima de fluidización, y los efectos de la presión y la temperatura en el lecho para el caso gas-sólido que es el empleado en el presente proyecto.

3.6.1. Pérdida de carga

En primer lugar, es necesario entender que si un gas se mueve en sentido ascendente a través de un lecho fijo de partículas sufre una pérdida de carga, que aumenta con el incremento de su velocidad debido a la resistencia de las partículas. Para que el lecho comience a fluidizar es necesario que las partículas se encuentren sustentadas por el gas y para ello es necesario que el efecto del peso de las propias partículas sea equivalente al empuje que ofrece el fluido.

Es decir, el inicio de la fluidización viene caracterizado por una pérdida de carga del fluido que se puede definir como:

$$\nabla p = \frac{(\rho_p - \rho_g)LA(1 - \varepsilon_{mf})g}{A} \quad (2.2.)$$

Si simplificamos esta ecuación, obtenemos:

$$\nabla p = (\rho_p - \rho_g)LA(1 - \varepsilon_{mf})g \quad (2.3.)$$

Donde ρ_p es la densidad del lecho de partículas, L es la altura del lecho con una sección transversal A , una fracción de vacío ε_{mf} y con ρ_g como la densidad del fluido (gas en nuestro caso).

En la siguiente gráfica podemos comprobar la evolución de la pérdida de carga: es decir de la presión a través del lecho en función de la velocidad superficial del fluido:

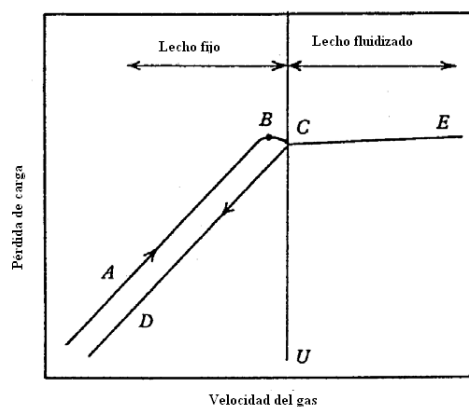


Figura 4. Curva Pérdida de carga vs. Velocidad para sistemas sólidos-gas

En primer lugar, se diferencian claramente dos comportamientos distintos: el de lecho fijo y el de lecho fluidizado, cuyo punto de inflexión se establece por la velocidad de mínima fluidización.

Se comprueba que la presión aumenta de forma lineal y existe mayor pérdida de carga en el tramo AB tomada en sentido ascendente. Esto se debe a que cuando se incrementa poco a poco la velocidad del gas desde cero, se debe vencer la fuerza de atracción entre las partículas del lecho. Este fenómeno no se da en el tramo de la curva descendente CD, ya que cuando se defluidiza no es necesario vencer esas fuerzas. Por tanto, podemos afirmar que para partículas con una relación mayor de compactación el incremento de la pérdida de carga se hace más pronunciado.

De todos modos, como hemos comentado anteriormente, existen dos estados bien diferenciados: en el de lecho fijo donde la pérdida de carga aumenta con la velocidad superficial del gas, donde el movimiento relativo de las partículas es nulo y su separación constante; y en otro tramo donde el lecho está fluidizado y la pérdida de carga se mantiene constante. En este último estado de lecho fluidizado, se relacionan las dos variables a estudio (pérdida de carga y velocidad del gas) por medio de la ecuación de Ergun:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu U_{mf}}{(\phi d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g U_{mf}^2}{\phi d_p} \quad (2.4.)$$

Siendo U_{mf} la velocidad de mínima fluidización, μ la viscosidad dinámica del gas, ϕ la esfericidad, d_p el diámetro de partícula y ε_{mf} su fracción de vacío.

Volviendo a la ecuación anterior, el primer término de la expresión se refiere a los esfuerzos viscosos y el segundo a los inerciales. De este modo, en condiciones de flujo laminar, es decir a bajas velocidades, domina el término viscoso; y en condiciones de flujo turbulento domina el segundo. En función del número de Reynolds se considera flujo completamente laminar cuando $Re_{mf} < 10$ y flujo completamente turbulento cuando $Re_{mf} > 2000$.

Por tanto, la presión de flujo viene definida en función de la esfericidad y la fracción de vacío o porosidad, que están directamente relacionada como muestra la siguiente gráfica:

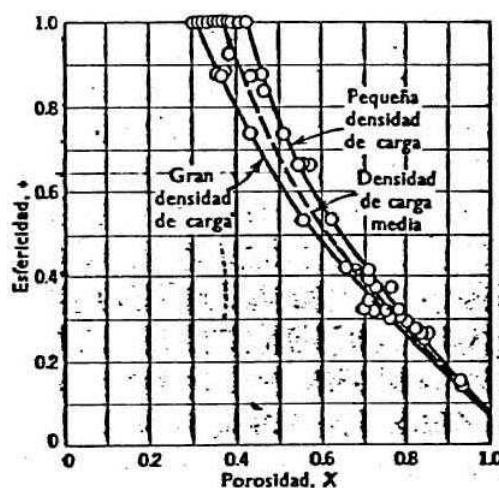


Figura 5. Variación de la esfericidad con la porosidad de las partículas

El valor de la porosidad o fracción de vacío ε_{mf} resulta difícil de calcular debido a que al pasar a un estado de mínima fluidización, la distancia entre partículas aumenta y con ello la porosidad. De este modo, diferentes investigadores han recogido diferentes valores experimentales de este factor para distintas condiciones de tamaño y naturaleza de la partícula.

Partículas	Tamaño, d_p (mm)						
	0.02	0.05	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40
Arena fina, $\phi = 0.67$		0.60	0.59	0.58	0.54	0.50	0.49
Arena gruesa, $\phi = 0.86$		0.56	0.52	0.48	0.44	0.42	
Mezcla de arenas			0.42	0.42	0.41		
Carbón y polvo de cristal	0.72	0.67	0.64	0.62	0.57	0.56	
Antracita, $\phi = 0.63$		0.62	0.61	0.60	0.56	0.53	0.51
Carbón en polvo	0.74	0.72	0.71	0.69			
Catalizador Fischer-Tropsch $\phi = 0.58$				0.58	0.56	0.55	
Carburo		0.61	0.59	0.56	0.48		

Tabla 1. Valores de porosidad para diferentes tipos y tamaños de partículas en régimen de mínima fluidización

Sin embargo, la ecuación de Ergun se utiliza para determinar la pérdida de carga en todo el rango de condiciones de flujo, sin tener en cuenta el régimen en que esté actuando. Por ello se emplea la siguiente relación de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{U_{mf} d_p \rho_d}{(1 - \varepsilon_{mf}) \mu_g} \quad (2.5.)$$

3.6.2. Velocidad mínima de fluidización

La velocidad de mínima fluidización define el paso del estado de lecho fijo a lecho fluidizado; es decir, es la velocidad superficial del gas a la que el lecho comienza a fluidizar y se define como U_{mf} . Si igualamos la expresión de la pérdida de carga en el lecho fijo (ecuación 2.3.) con la expresión de pérdida de carga para lecho fluidizado (ecuación 2.4.) se obtiene:

$$\frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \right) + 1.75 \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \right)^2 \quad (2.6.)$$

A partir del conocimiento de las propiedades del fluido y de las partículas, además de la fracción de vacío del lecho, se puede determinar la velocidad de mínima fluidización. Esta ecuación se puede escribir en función del número de Reynolds y el número adimensional de Arquímedes, como vemos a continuación:

$$\text{Ar} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \text{Re}_{mf} + \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} \text{Re}_{mf}^2 \quad (2.7.)$$

Donde el número de Arquímedes viene definido como:

$$\text{Ar} = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu_g^2} \quad (2.8.)$$

O tan sólo escribiéndola en función del número de Reynolds:

$$(1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) g \frac{\rho_g d_p^3}{\mu_g^2} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \text{Re}_{mf} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \text{Re}_{mf}^2 \quad (2.9.)$$

Y Re_{mf} , como el número de Reynolds de mínima fluidización, se define como:

$$\text{Re}_{mf} = \frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu_g} \quad (2.10.)$$

En el caso especial de partículas muy pequeñas, la ecuación se simplifica del siguiente modo:

$$U_{mf} = \frac{(\rho_p - \rho_g)gd_p^2}{150\mu} \frac{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2}{1 - \varepsilon_{mf}}, \quad \text{Re}_{mf} < 20 \quad (2.11.)$$

Y para partículas más grandes:

$$U_{mf}^2 = \frac{(\rho_p - \rho_g)gd_p}{1.75\rho_g} \varepsilon_{mf}^3 \phi, \quad \text{Re}_{mf} > 1000 \quad (2.12.)$$

Cuando ε_{mf} y/o ϕ no son conocidos, uno puede estimar la velocidad mínima de fluidización reescribiendo la ecuación (2.7.) como:

$$K_1 \text{Re}_{mf}^2 + K_2 \text{Re}_{mf} = Ar \quad (2.13.)$$

Donde:

$$K_1 = \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} \quad \text{y} \quad K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \quad (2.14.)$$

Wen y Yu fueron los primeros en observar que K_1 y K_2 permanecen casi constantes para diferentes tipos de partículas y condiciones del lecho para valores de número de Reynolds de 0.001 a 4000, consiguiendo una desviación estándar de un 34 % en los resultados de predicciones de la velocidad mínima de fluidización. Desde entonces, otros investigadores han dado distintos valores a las constantes K_1 y K_2 , como se observa en la siguiente tabla:

Investigadores	$K_2/2K_1$	$1/K_1$
Wen y Yu	33.7	0.0408
Richardson	25.7	0.0365
Saxena y Vogel	25.3	0.0571
Babu et al.	25.3	0.0651
Grace	27.2	0.0408
Chitester	28.7	0.0494

Tabla 2. Resultados empíricos de las constantes K_1 y K_2

De este modo, para determinar la velocidad de mínima fluidización hay que conocer antes la densidad y diámetro de las partículas, y la viscosidad y densidad del fluido durante la operación. También es necesario conocer el valor de la fracción de vacío de mínima fluidización, cuya predicción presenta la

principal dificultad. Aunque se ha observado que el valor ε_{mf} se encuentra en un rango de 0.4 a 0.5 en la fluidización de partículas esféricas de tamaño uniforme (Leva 1959; Zenz 1957).

Utilizando los valores recomendados por Wen y Yu (1966) para partículas pequeñas se da la siguiente expresión:

$$\text{Re}_{mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} = \sqrt{33.7^2 + 0.0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2}} - 33.7 \quad (2.15.)$$

Esta es tan sólo una de las muchas correlaciones que se han propuesto para predecir el valor de la velocidad de mínima fluidización, que resulta ser un valor necesario y el más importante para el diseño de lechos fluidizados.

3.6.3. Presión y temperatura del lecho fluido

El efecto de la presión y la temperatura en el lecho ha sido estudiado por numerosos investigadores, teniendo en cuenta que su comportamiento varía en función de estos factores para cualquier proceso en el que se utilicen materiales y/o elementos que puedan variar sus propiedades con las condiciones de utilización. Los efectos de la presión en el lecho se describen a continuación:

- La porosidad de mínima fluidización aumenta de un 1 a un 4% con un aumento de la presión ambiente.
- La velocidad de mínima fluidización decrece con un aumento de la presión. Sin embargo, esta reducción es inapreciable para lechos de partículas con diámetro menor a 100 μm pero resulta significativo, con variaciones de hasta un 40 % para partículas de aproximadamente 360 μm .
- La relación de velocidad mínima en régimen burbujeante y velocidad mínima de fluidización, en partículas de diámetro 450 μm , se puede incrementar hasta un 30 % con un aumento de la presión. Este fenómeno puede ayudar a elegir el tamaño de la partícula en función del régimen de funcionamiento que se desee emplear.

El efecto de la temperatura también ha sido estudiado por numerosas investigaciones, y Saxena y Vogel y Kitano et al. estudiaron los efectos combinados de elevadas temperaturas a alta presión. Sin embargo, existen contradicciones entre algunas de sus conclusiones, que podemos resumir en:

- La porosidad de mínima fluidización incrementa con la temperatura hasta un 8% por encima de los 500 $^{\circ}\text{C}$.

3.7. Caracterización de partículas

El comportamiento del lecho depende entre otros de las características y propiedades de las partículas que contiene, por este motivo en el siguiente apartado pasamos a analizar los tipos de partículas en lechos fluidos, definimos algunas de sus propiedades más importantes y por último explicamos el fenómeno de la aglomeración y sus efectos en el propio lecho.

3.7.1. Clasificación de las partículas de fluidización

No todas las partículas pueden ser fluidizadas. El comportamiento de las partículas sólidas en lechos fluidos depende principalmente de su tamaño y densidad. Una observación cuidadosa de Geldart (1973,1978) muestra en la figura 6 las características de los cuatro grandes grupos que fueron formulados como se describe a continuación:

- *Grupo A.* Estos materiales tienen un tamaño de partícula pequeño ($d_p < 30 \mu\text{m}$) y/o densidad de partícula baja ($< \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$). Los catalizadores de craqueo son típicos en esta categoría. Estos sólidos fluidizan rápidamente, con una fluidización uniforme con velocidades de gas lenta y sin la formación de burbujas. Con velocidad de gas más elevada, eventualmente se alcanza un punto en el que las burbujas empiezan a formarse a la velocidad de mínima fluidización.
- Para el *Grupo B* algunos lo llaman como el de partículas burbujeantes. La mayoría de las partículas de este grupo tienen un tamaño de $150 \mu\text{m}$ a $500 \mu\text{m}$ y una densidad que oscila entre 1.4 a 4 g/cm^3 . Para estas partículas, una vez se excede la velocidad de mínima fluidización, aparece el exceso de gas en forma de burbujas. Las burbujas en un lecho de partículas tipo B pueden crecer hasta obtener un gran tamaño. Normalmente se utiliza el grupo B para materiales del lecho vidriosos y arenosos.
- Los materiales del *grupo C* es el característico de partículas muy finas. Sus tamaños son normalmente menores a $30 \mu\text{m}$ y son extremadamente difíciles de fluidizar porque las fuerzas intraparticulares son relativamente grandes, comparado con aquellas que pasan por la acción del gas. Para diámetro de lechos pequeños, las partículas del grupo C forman fácilmente canales. Algunos ejemplos de los materiales del grupo C son el talco, la harina y el hormigón.
- Los materiales del *Grupo D* tampoco son muy grandes o densos pero sí difíciles de fluidizar en lechos profundos. A diferencia de las partículas del grupo B, cuando la velocidad aumenta, se puede formar un chorro en el lecho y el material puede entonces salir con el chorro en una especie de efecto arrojadizo.

Si la distribución del gas es desigual, también se puede esperar un comportamiento arrojadizo y fuertes canales. Granos de café asados, perdigones y algunas menas de metal asadas son ejemplos de materiales del grupo D.

La clasificación de Geldart es clara y fácil de usar para condiciones ambiente de fluidización y para U menor a $10 \cdot U_{mf}$, como muestra la figura 6. Para cualquier sólido de una conocida densidad ρ_s y un tamaño medio de partícula d_p el gráfico muestra el tipo de fluidización esperada. También ayuda a predecir otras propiedades como el tamaño de las burbujas, su velocidad, la existencia de slugs, etc.

Cabe destacar que cuando el tamaño de las burbujas es aproximadamente 0.6 veces el diámetro del lecho se pueden apreciar los denominados slugs. Debemos evitar este proceso debido a que producen grandes fluctuaciones de presión que dan lugar a muchas vibraciones en la instalación. Este efecto no ocurre si la velocidad superficial del gas es relativamente moderada y el tamaño del lecho relativamente grande comparado con el tamaño de las burbujas.

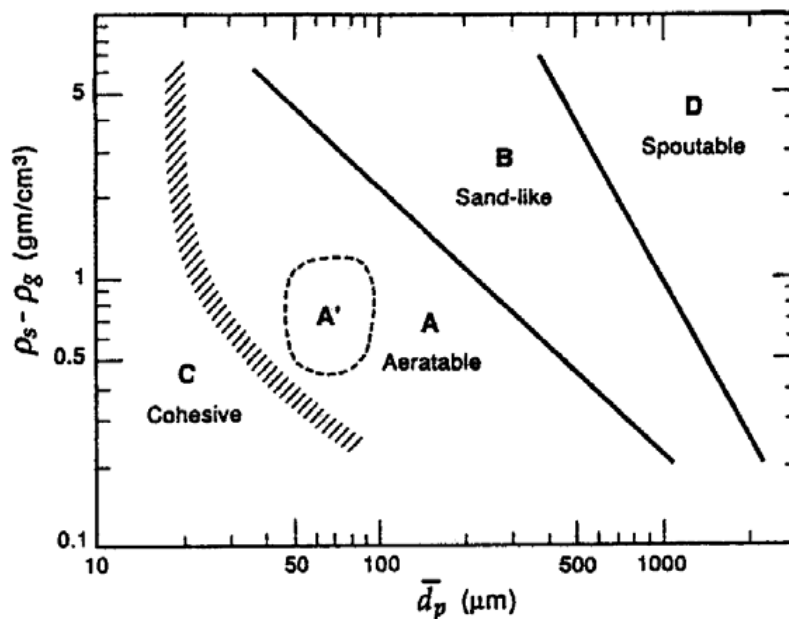


Figura 6. Clasificación de las partículas según Geldart

3.7.2. Propiedades de las partículas de fluidización

A continuación describimos algunos de los parámetros más importantes en las partículas:

- *Densidad de las partículas, ρ_p* , que se define como el cociente entre la masa de la partícula y el volumen hidrodinámico. Este último valor se refiere al volumen visto por el fluido en su interacción con la partícula, incluidas todas sus imperfecciones.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_h} \quad (3.1.)$$

- *Densidad aparente del lecho, ρ_b* , que se define como el cociente entre la masa que ocupan todas las partículas del fluido y su volumen aparente, o el volumen que ocupan dichas partículas (incluyendo sus espacios vacíos):

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}} \quad (3.2.)$$

$$V_{ap} = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (3.3.)$$

- *Fracción de vacío del lecho, ε* , establece la relación de volumen entre los espacios entre partículas y el volumen aparente del lecho:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Sigma V_h}{V_{ap}} \quad (3.4.)$$

Por tanto, podemos establecer una relación entre las densidades de la partícula y el lecho del siguiente modo:

$$\rho_b = (1 - \varepsilon) \rho_p \quad (3.5.)$$

- *Fracción de lecho en burbujas o de volumen, δ* , se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{u_0 - u_{mf}}{u_b - u_{mf}} \quad (3.6.)$$

De tal modo que relaciona las velocidades mínima de fluidización u_{mf} , la velocidad inicial u_0 y la velocidad de la burbuja u_b .

3.7.3. Aglomeración de partículas a altas temperaturas

La aglomeración de partículas supone un serio problema porque si esto ocurre el comportamiento del lecho fluidizado puede cambiar drásticamente. Gluckman et al.



realizó una investigación de este fenómeno para un lecho de partículas de cobre, de tal modo que calentando progresivamente se llegaba a un punto de pérdida de fluidización debida a la generación de aglomerados, dando lugar a un aumento de la velocidad de mínima fluidización en función de la temperatura del lecho.

Además, descubrió otro efecto debido a la aglomeración de partículas. Situó una muestra de partículas en un cilindro y lo comprimió para después calentarlo lentamente, notando así como el lecho se expandía debido a la expansión térmica y que después se ralentizaba, cesaba y la muestra finalmente volvía a contraerse.

En resumen, este fenómeno debe tenerse en cuenta para operaciones a elevadas temperaturas y en aplicaciones en las que puedan existir otros materiales en el lecho o cualquier tipo de impurezas.

3.8. Burbujas en lechos fluidos

Cuando hablamos sobre lechos fluidos, la mayoría se refieren al tipo lecho fluido burbujeante. Los lechos fluidizados de gas son caracterizados por las “burbujas” que forman velocidades superficiales de gas ligeramente más altas que las necesarias para fluidizar las partículas. Este tipo de fluidización se llama “fluidización agregativa”, y bajo estas condiciones, el lecho se divide en dos partes: una parte que atraviesa el lecho en forma de burbujas y otra que lo hace mediante la emulsión gas-sólido. Las burbujas aparecen de manera muy similar a las burbujas de gas formadas en un líquido y se comportan de forma parecida. Cabe la posibilidad de que las burbujas se unan mientras se elevan por el lecho.

El movimiento de las partículas en lechos fluidos es conocido dependiendo en gran parte por la ascensión de las burbujas a través del lecho. Por lo tanto, se presta especial atención a las burbujas y sus propiedades. Para obtener una impresión de los procesos ocurridos dentro de un reactor de lecho fluido, los principios de fluidización, la formación de burbujas, su camino en el lecho, el modo en que ellos transportan las partículas y demás parámetros importantes son descritos a continuación.

3.8.1. Patrón de flujo de fluidización en burbujas

Como las burbujas ascienden a través del lecho, coalescen a burbujas más grandes y cuando lo son demasiado pueden separarse y explotar al llegar a la superficie como veremos en el siguiente apartado. El tamaño medio de la burbuja se equilibra con el máximo tamaño estable. La localización en el lecho donde se alcanza el tamaño de equilibrio depende del tipo de partículas empleadas. Para las partículas del grupo A, el máximo diámetro estable es relativamente pequeño, por lo tanto el tamaño promedio de la burbuja se estabiliza cerca del plato del distribuidor y se mantiene constante en el resto del lecho. El máximo diámetro estable para las partículas del grupo B es más grande y se alcanza el equilibrio normalmente sólo en los niveles superiores del lecho. Las burbujas en lechos de partículas tipo D se comportan de forma distinta; no suben como burbujas individuales, pero sí como enjambres horizontalmente asociados.

Las burbujas pueden confluir de dos maneras, mediante la incorporación de una burbuja en el frente o por movimiento hacia los lados en el camino de otra burbuja e incorporándose en ella. En la pared del lecho, las burbujas sólo pueden moverse hacia el interior, mientras otras burbujas pueden moverse en cualquier dirección horizontal. El resultado es una zona activa lejana de la pared, la cual se intensifica y se mueve cerca del eje del cilindro al incrementar la distancia al plato de distribución. Las partículas sólidas, se arrastran por las burbujas y, por continuidad, se moverá en regiones bajas con menores densidades de burbuja.

Como consecuencia de haber menos burbujas cerca de la pared, hay un flujo descendente predominante de partículas próximo a la pared, la cual, una vez estabilizada, mantiene la tendencia de las burbujas a moverse hacia dentro. La circulación general es ascendente y cercana al eje y descendente cerca de las paredes en regiones más elevadas; lo contrario parece ser el caso en regiones más bajas.

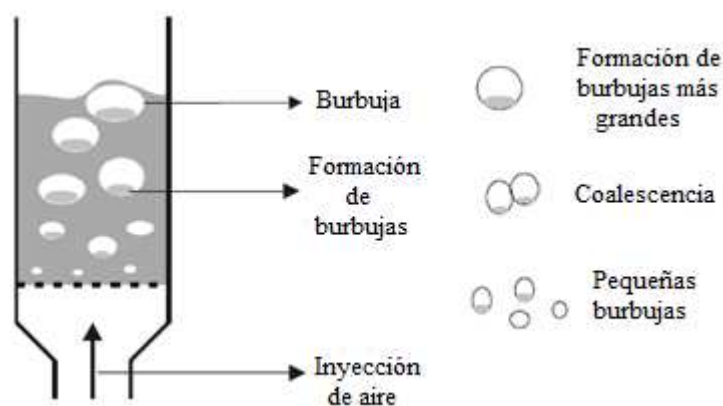


Figura 7. *Un lecho fluido libre burbujeante y modos de coalescencia de burbujas*

El patrón de circulación puede ser modificado por componentes, como tubos o deflectores o perturbados por una mala distribución del plato distribuidor. A parte de la mala distribución causada por el plato que perturba el patrón de flujo, Merry y Davidson (1973) encontraron un fenómeno llamado “gulf streaming”. Este fenómeno es causado por un flujo de burbujas no uniforme, causando un flujo general de material ascendente en una parte del lecho, y descendente en otro. Debido a este efecto, muchos más materiales son llevados a lo alto del lecho por el flujo de burbujas de lo que se esperaría en función de éste en una fase de retroalimentación de sí mismas, y así el flujo descendente en la mayor parte es también más elevado. El “gulf streaming” causará la fluidización de las burbujas para moverse más rápidas que la que se esperaría para una velocidad de burbuja única. Por otro lado, se pueden esperar ciertos deslizamientos entre las burbujas y la fase densa en la región de movimiento ascendente.

3.8.2. Formación y crecimiento de las burbujas

La formación de burbujas en un lecho se comporta de la misma manera que si fuese en un líquido a baja densidad. Al introducir aire por el plato distribuidor se forma una serie de burbujas que suben por el lecho hasta su superficie y una vez la alcanzan, éstas estallan provocando fluctuaciones de presión. El ascenso de las burbujas también provoca a su paso fluctuaciones de presión. Cabe recordar que la formación de las burbujas se produce cuando el lecho ya ha fluidizado. Algunas características de las burbujas son las siguientes:

- Cuando las burbujas son pequeñas su forma es esférica y a medida que se hacen más grande su forma pasa a ser aplanada.
- Las burbujas pequeñas ascienden más lentamente que las más grandes.
- Pueden formarse burbujas de mayor tamaño por coalescencia de otras más pequeñas. La dirección de la burbuja final se mantiene respecto a la dirección de las anteriores.

Cuando la velocidad del gas es superior a la de mínima fluidización, el exceso de aire pasa a través del lecho en forma de burbujas ascendentes de igual modo que lo harían las burbujas de aire en un líquido de baja densidad.

3.8.3. Tamaño y velocidad de la burbuja

El tamaño principal de la población de burbujas en lechos fluidos aumenta con la altura sobre el plato del distribuidor para dar lugar a la coalescencia de las burbujas. Las investigaciones han intentado predecir el tamaño de las burbujas, no sólo la variación de tamaño, sino también las distribuciones de diámetros y volumen.

Ya desde que el tamaño principal de la burbuja era un asunto importante a tratar, Geldart (1972) usó la expresión de Kato y Wen (1969) para un tamaño de burbuja inicial del distribuidor de gas. Él afirmó que un plato de distribuidor poroso se comporta como un plato de distribuidor de un agujero por 10 cm^2 , y añadió su propia expresión empírica para el crecimiento de la burbuja con la altura del lecho h debido a la coalescencia:

$$d_b = \frac{1.43}{g^{0.2}} \left(\frac{(U - U_{mf}) \pi D_t^2}{4N_0} \right)^{0.4} + 2.05 (U - U_{mf})^{0.94} h \quad (3.7.)$$

Donde d_b es el diámetro de la burbuja, D_t el diámetro del lecho y N_0 el número de agujeros del plato distribuidor.

Han sido desarrolladas numerosas correlaciones como la vista anteriormente para estimar el diámetro equivalente de la burbuja (Mori y Wen, 1975; Darton et al., 1977; Horio y Nonaka, 1987), y la mayoría de ellas conducen a los mismos resultados. Para las partículas del grupo B, que son las que analizamos en el presente proyecto, la correlación de Darton et al. (1977) ha sido ampliamente utilizada para estimar el diámetro equivalente de la burbuja bajo las condiciones de lecho burbujeantes sin slugging y tamaño máximo de burbuja estable.

Para el crecimiento modelo de la burbuja en lechos fluidos de dos dimensiones, se adopta un enfoque paralelo al desarrollado por Darton. El diámetro equivalente de la burbuja para lechos fluidos burbujeantes en dos dimensiones, d_b , se puede expresar como:

$$d_b^{\frac{3}{2}} = \frac{8 \left(2^{\frac{3}{4}} - 1 \right) (U_0 - U_{mf})}{\lambda \sqrt{g}} \left(h + \frac{\lambda}{\pi \left(2^{\frac{3}{4}} - 1 \right)} \frac{A_0}{t} \right) \quad (3.8.)$$

Donde h es la altura del lecho sobre el distribuidor, A_0 es el área del distribuidor por orificio, t es el espesor del lecho bidimensional y λ es una constante. Para las mediciones experimentales que se realizan en el presente proyecto del diámetro equivalente, la constante λ será ~ 6.5 . Con la consideración de gas de flujo que atraviesa el lecho, el flujo volumétrico de la actual burbuja es menor que uno estimado por la teoría de 2ª fase de la fluidización. Resulta que el valor de λ es mayor que otro en lechos de tres dimensiones dado por Darton y que describe por medio de la siguiente ecuación:

$$d_b = 0.89 \left[(U_0 - U_{mf}) \left(h + \frac{3.0 A_0}{t} \right) \right]^{\frac{2}{3}} g^{-\frac{1}{3}} \quad (3.9.)$$

La altura es definida como la altura máxima de la burbuja h^* , más allá de que las burbujas no crezcan más y se vuelvan inestables y rompan. La altura h^* depende del tamaño de la partícula, y puede ser expresada como:

$$h^* = A \left(1 + 3 \exp \left(- \frac{U_0}{U_{mf}} \right) \right) D_t \quad (3.10.)$$

Donde A es el área transversal del lecho y D_t es el diámetro del lecho.

La velocidad de ascenso de la burbuja puede describirse como:

$$U_b = \Phi \sqrt{g d_b} \quad (\Phi = 0.80 - 1.0) \quad (3.11.)$$

Que en base a la teoría de la segunda fase de la fluidización, Davidson y Harrison propusieron del siguiente modo:

$$U_b = 0.711 \sqrt{g d_b} \quad (3.12.)$$

Esta expresión se usa extensamente en cálculos para la velocidad de ascenso de burbujas en lechos fluidos.

Esta ecuación no contiene la altura h^* ya que la velocidad de la burbuja se mantiene constante más allá de dicha altura. La densidad de la burbuja δ_b no es

uniforme sobre el contorno transversal del lecho. Incrementa con el tamaño de la partícula, y crece bastante lento para altas velocidades de fluidización.

3.8.4. Expansión del lecho

Con una velocidad media de burbuja $\langle U_b \rangle$ la fracción media del área de lecho ocupado por burbujas puede darse como:

$$\varepsilon_b = \frac{Q_b}{A_t \langle U_b \rangle} \quad (3.13.)$$

Asumiendo que la fracción de vacío de la fase particular iguala a la fracción de vacío de mínima fluidización, todo el gas en exceso de lo necesario para la mínima fluidización pasa por el lecho como burbujas y por tanto, la altura del lecho puede ser derivada:

$$h - h_{mf} = \int_0^h \frac{Q_b}{A_t \langle U_b \rangle} dz \quad (3.14.)$$

Si se puede hacer la suposición de que la velocidad de la burbuja sea constante en el lecho, la altura se puede estimar como:

$$\frac{h - h_{mf}}{h_{mf}} = \frac{U - U_{mf}}{U_b} \quad (3.15.)$$

Por tanto, la expansión del lecho es igual a la fracción del lecho consistente de burbujas:

$$\varepsilon_b = \frac{h - h_{mf}}{h} \quad (3.16.)$$

3.8.5. Esfericidad y porosidad del lecho

Generalmente, las partículas de un lecho fluidizado no tienen una forma esférica total, sino que presenta una serie de irregularidades. El parámetro que define su geometría es la esfericidad, que se expresa de la siguiente forma:

$$\phi = \left(\frac{\text{área superficial de la esfera}}{\text{área superficial de la partícula}} \right)_{\text{volumen}} \quad (3.17.)$$



Por medio de la ecuación anterior podemos determinar cuán de esférica es la partícula. El rango de valores de esfericidad oscila entre 0.5 y 0.9.

La porosidad del lecho y la esfericidad de las partículas empleadas están directamente relacionadas. De hecho, el estudio de la porosidad del lecho es bastante importante, ya que influye en parámetros como la velocidad mínima de fluidización o el crecimiento del lecho entre otros. También tenemos que considerar el tamaño y esfericidad de las partículas empleadas.

Sin embargo, el estudio sobre la influencia de estos factores no la tenemos en cuenta debido a que en el presente proyecto se usan partículas con un determinado tamaño y con esfericidad certificada.

4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

4.1. Simulación de lechos fluidos mediante técnicas de CFD

La simulación del lecho fluidizado fue realizado mediante la resolución de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento por medio del software FLUENT 6.3 CFD. Se utilizó un modelo Euleriano-Euleriano multifluido, que considera la conservación de masa y energía para las fases de gas y fluido. La teoría cinética de flujo granular, que considera la conservación de energía de fluctuación de sólidos, se empleó para el cierre de las ecuaciones teniendo en cuenta los términos de tensión entre los sólidos. Para completar las ecuaciones que gobiernan la simulación son necesarias las ecuaciones constitutivas. Los coeficientes de fuerza se calculan mediante las funciones de arrastre. En este estudio se han empleado las funciones Syamlal-O'Brien y Gidaspow con un coeficiente de restitución de las partículas de 0.9.

Debemos destacar que para el modelo empleado (gas-sólido), el método Lagrangiano se hace más difícil de emplear ya que aborda el problema a través del estudio de cada partícula por separado y a nivel computacional resulta muy costoso. Por ello, se utilizan modelos CFD, basados en modelos de dos fases donde se aplica la teoría cinética de los gases. En estos métodos se tienen en cuenta las fases como un medio continuo e interpenetrable.

4.2. Introducción teórica del modelo Euleriano-Euleriano y Euleriano-Lagrangiano

Los problemas fundamentales encontrados en la modelación hidrodinámica de un lecho fluidizado gas-sólido es el movimiento de dos fases donde la mezcla de ambos es desconocida y transitoria, y su interacción es sólo entendida en un limitado rango de condiciones (Gilbertson and Yates, 1996). La primera intuición en la resolución de la mezcla de dos fases es tratar a cada una de ellas por la mecánica de medios continuos con condiciones de contorno y después pasar a resolver las ecuaciones que rigen las interfaces (Ishii, 1975).

Sin embargo, en los últimos tiempos la dinámica de fluidos computacional, CFD, está emergiendo como una nueva herramienta muy prometedora en el modelado hidrodinámico. Estando actualmente en desarrollo para flujos multifásicos, tales como lechos fluidos. Se han tratado dos enfoques diferentes en el modelado mediante CFD de lechos fluidizados gas-sólido: un método discreto basado en dinámica molecular (modelo Lagrangiano); y un enfoque continuo basado en mecánica continua tratando las dos fases como un medio continuo e interpenetrable (multifluido o modelo Euleriano-Euleriano). Estos dos métodos han sido comparados por Gera et al. (1998).

En el modelo Lagrangiano, las ecuaciones newtonianas de movimiento para cada partícula individual son resueltas con inserción de los efectos de colisiones de partículas

y fuerza debido al gas. Las colisiones partícula-partícula son modeladas como una esfera rígida (Gera et al., 1998) o como enfoque de esfera suave (Kobayashi et al., 2000). El método DEM, “Discrete Element Model”, es uno de los modelos de trayectoria, que puede calcular la velocidad de la partícula y la correspondiente trayectoria de la misma para examinar las interacciones, tales como las debidas a las colisiones entre ellas (Kaneko et al., 1999). Los modelos de trayectoria se aplican a flujos multifásicos para diluir sistemas donde no es adecuado un modelo continuo de partículas. Aunque los modelos basados en DEM permiten que los efectos de las propiedades de varias partículas en el movimiento del fluido sean estudiados, es computacionalmente muy costoso, como ya se comentó con anterioridad. Debido a las limitaciones computacionales, el modelo Euleriano-Lagrangiano normalmente está limitado a un número de partículas relativamente pequeño. Por lo tanto, este modelo multifluido es la opción preferida para las simulaciones hidrodinámicas macroscópicas y no se utilizará en la realización de este proyecto.

El modelo Euleriano-Euleriano, con las fases fluido y sólido tratadas como fases continuas interpenetrantes, es comúnmente el método más utilizado para la simulación de lechos fluidos (Pain et al., 2001). En el presente proyecto las partículas sólidas tienen las mismas condiciones de densidad y diámetro. La idea general en la formulación de modelo multifásico es tratar cada fase como continua e interpenetrable.

Aunque los coeficientes de transporte de la fase gas puedan ser representados razonablemente para flujo de una fase bajo ciertas modificaciones, los coeficientes de transporte de la fase sólida deben explicar las interacciones de partículas con el gas y las colisiones entre las distintas partículas.

La transferencia de momento en la interfase entre gas y sólido es una de las fuerzas dominantes en los balances de cantidad de movimiento de las fases sólida y gaseosa. Este intercambio entre fases viene representado por la fuerza de arrastre. La fuerza de arrastre de una única esfera en un fluido ha sido estudiada y correlacionada de un modo empírico, por Clift et al. (1978) y Bird et al. (2002), para una amplia gama de número de Reynolds en partículas. Sin embargo, cuando una partícula se mueve en una mezcla dispersa bifásica, el arrastre se ve afectado por la presencia de las demás partículas. Se han informado en la literatura de numerosas correlaciones para el cálculo del coeficiente de intercambio de momento, incluyendo aquellas de Syamlal y O’Brien (1989), Gidaspow (1994), y Wen y Yu (1966).

La ecuación de movimiento de la fase sólida contiene un término adicional para el intercambio de momento debido a las colisiones partícula-partícula. La ausencia del término de tensión de la fase de partículas en la ecuación de cantidad de movimiento ha conducido a diferentes modelos adoptando diferentes métodos de cierre, incluyendo el modelo de la teoría cinética (Sinclair y Jackson, 1989; Gidaspow, 1994; Hrenya y Sinclair, 1997). La aplicación de la teoría cinética al modelo de movimiento de una

colección de partículas esféricas casi elásticas está basada en una analogía de la teoría cinética de gases densos. La temperatura granular, Θ , está definida para representar la energía cinética específica de las fluctuaciones de velocidad o la energía traslacional de las fluctuaciones resultante de las fluctuaciones de velocidad de las partículas. La ecuación de temperatura granular para partículas puede ser expresada en términos de producción de fluctuaciones por distorsión, disipación del flujo de calor cinético y colisiones, disipación debido a las colisiones inelásticas, producción debido a la turbulencia del fluido o a las colisiones con moléculas, y disipación debido a la interacción con el fluido (Gidaspow, 1994). Se han realizado numerosos estudios de capacidad del enfoque de la teoría cinética para modelar lechos fluidos burbujeantes (Pain et al., 2001 o Din y Gidaspow, 1990).

Por tanto, la temperatura granular puede definirse, como ya hemos descrito con anterioridad, como la medida de la energía de las fluctuaciones de velocidad de las partículas sólidas y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\Theta_s = \frac{1}{3} v'^2 \quad (4.1.)$$

donde Θ_s es la temperatura granular y v' es la velocidad de fluctuación de las partículas.

A pesar de los desafíos de modelado, la aplicación de CFD al modelo hidrodinámico de lechos fluidos continua en desarrollo, ya que tiene muchas ventajas incluyendo la optimización del diseño y el escalado de dichos sistemas. Como resultado, el modelo y sus parámetros deben ser validados con mediciones experimentales obtenidas a escala similar y determinadas configuraciones o modelos teóricos. Algunos de los desafíos con respecto a la validación del modelo en CFD para sistemas gas-sólido han sido descritos por Grace y Taghipour (2004).

4.3. Ecuaciones Eulerianas de conservación para flujos granulares

4.3.1. Ecuaciones de conservación para flujos granulares

Ecuaciones de conservación de masa de fases sólido y gas

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \bar{v}_g) = 0 \quad (4.2.)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \bar{v}_s) = 0 \quad (4.3.)$$

Ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento de las fases gaseosa y sólida

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \bar{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \bar{v}_g^2) = \\ -\alpha_g \cdot \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \alpha_g \cdot \rho_g \cdot \bar{g} - K_{gs} \cdot (\bar{v}_g - \bar{v}_s) \end{aligned} \quad (4.4.)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \bar{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \cdot \rho_s \cdot \bar{v}_s^2) = \\ -\alpha_s \cdot \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \cdot \rho_s \cdot \bar{g} + K_{gs} \cdot (\bar{v}_g - \bar{v}_s) \end{aligned} \quad (4.5.)$$

4.3.2. Modelos semiempíricos de cierre de las ecuaciones

Coefficiente de intercambio

- Función de arrastre de Gidaspow:

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \cdot C_D \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_g \cdot \rho_g \cdot |\bar{v}_s - \bar{v}_g|}{d_s} \cdot \alpha_g^{-2.65} \quad \text{para } \alpha_g > 0.8 \quad (4.6.)$$

$$K_{gs} = 150 \cdot \frac{\alpha_s^2 \cdot \mu_g}{\alpha_g \cdot d_s^2} + 1.75 \cdot \frac{\alpha_s \cdot \rho_g \cdot |\bar{v}_s - \bar{v}_g|}{d_s} \quad \text{para } \alpha_g \leq 0.8 \quad (4.7.)$$

donde

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g \cdot \text{Re}_s} \cdot [1 + 0.15 \cdot (\alpha_g \cdot \text{Re}_s)^{0.687}] \quad (4.8.)$$

y

$$\text{Re}_s = \frac{\rho_g \cdot d_s \cdot |\bar{v}_s - \bar{v}_g|}{\mu_g} \quad (4.9.)$$

- *Función de arrastre de Syamlal-O'Brien:*

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\alpha_s \cdot \alpha_g \cdot \rho_g}{v_{r,s}^2 \cdot d_s} \cdot C_D \cdot \left(\frac{\text{Re}_s}{v_{r,s}} \right) \cdot |\bar{v}_s - \bar{v}_g| \quad (4.10.)$$

donde

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\text{Re}_s / v_{r,s}}} \right)^2 \quad (4.11.)$$

y

$$v_{r,s} = 0.5 \cdot \left(A - 0.06 \cdot \text{Re}_s + \sqrt{(0.06 \cdot \text{Re}_s)^2 + 0.12 \cdot \text{Re}_s \cdot (2 \cdot B - A) + A^2} \right) \quad (4.12.)$$

con

$$A = \alpha_g^{4.14}, \quad B = 0.8 \alpha_g^{1.28} \quad \text{para} \quad \alpha_g \leq 0.85 \quad (4.13.)$$

o

$$A = \alpha_g^{4.14}, \quad B = \alpha_g^{2.65} \quad \text{para} \quad \alpha_g > 0.85 \quad (4.14.)$$

Ecuaciones constitutivas

- *Tensor de tensiones de la fase sólida:*

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \bar{v}_s + \bar{v}_s^T) + \alpha_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \bar{v}_s \bar{I} \quad (4.15.)$$

- *Función de distribución radial:*

$$g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,\max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (4.16.)$$

- *Coefficiente de difusión de temperatura granular (Syamlal O'Brien):*

$$k_{\Theta_s} = \frac{15 \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \alpha_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{4 \cdot (41 - 33 \cdot \eta)} \quad (4.17.)$$

$$\left[1 + \frac{12}{5} \cdot \eta^2 \cdot (4 \cdot \eta - 3) \cdot \alpha_s \cdot g_{0,ss} + \frac{16}{15 \cdot \pi} (41 - 33 \cdot \eta) \cdot \eta \cdot \alpha_s \cdot g_{0,ss} \right]$$

donde

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot (1 + e_{ss}) \quad (4.18.)$$

- *Coefficiente de difusión de temperatura granular (Gidaspow):*

$$k_{\Theta_s} = \frac{150 \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{384 \cdot (1 + e_{ss}) \cdot g_{0,ss}} \quad (4.19.)$$

$$\left[1 + \frac{6}{5} \cdot \alpha_s \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2 \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot \alpha_s^2 \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \sqrt{\frac{\Theta_s}{\pi}}$$

- *Energía de disipación por colisiones:*

$$\gamma_{\Theta_m} = \frac{12 \cdot (1 - e_{ss}^2) \cdot g_{0,ss}}{d_s \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \rho_s \cdot \alpha_s^2 \cdot \Theta_s^{3/2} \quad (4.20.)$$

- *Energía cinética de transferencia:*

$$\phi_{gs} = -3 \cdot K_{gs} \cdot \Theta_s \quad (4.21.)$$

- *Presión de la fase sólida:*

$$p_s = \alpha_s \cdot \rho_s \cdot \Theta_s + 2 \cdot \rho_s \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \alpha_s^2 \cdot g_{0,ss} \cdot \Theta_s \quad (4.22.)$$

- *Viscosidad cortante de la fase sólida:*

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (4.23.)$$

- *Viscosidad de colisión entre sólidos:*

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \cdot \alpha_s \cdot \rho_s \cdot d_s \cdot g_{0,ss} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \left(\frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (4.24.)$$

- *Viscosidad por fricción de la fase sólida:*

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \cdot \sin \phi}{2 \cdot \sqrt{I_{2D}}} \quad (4.25.)$$

- *Viscosidad cinemática (Syamlal-O'Brien):*

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{6(3 - e_{ss})} \cdot \left[1 + \frac{2}{5} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot (3 \cdot e_{ss} - 1) \cdot \alpha_s \cdot g_{0,ss} \right] \quad (4.26.)$$

- *Viscosidad cinemática (Gidaspow):*

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 \cdot d_s \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\Theta_s \cdot \pi}}{96 \cdot \alpha_s \cdot (1 + e_{ss}) \cdot g_{0,ss}} \cdot \left[1 + \frac{4}{5} \cdot (1 + e_{ss}) \cdot \alpha_s \cdot g_{0,ss} \right]^2 \quad (4.27.)$$

- *Viscosidad volumétrica:*

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (4.28.)$$

- *Conservación de la energía granular Θ_s :*

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial t} \cdot (\rho_s \cdot \alpha_s \cdot \Theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \cdot \alpha_s \cdot \bar{v}_s \cdot \Theta_s) \right] = \\ \left(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s \right) : \nabla \cdot \bar{v}_s + \nabla \cdot (k_{\Theta_s} \cdot \nabla \cdot \Theta_s) - \gamma_{\Theta_s} \end{aligned} \quad (4.29.)$$

5. INSTALACIÓN SIMULADA

En este apartado analizamos el experimento simulado en el presente proyecto: el modelo físico utilizado para la realización de los distintos casos y que sirve para definir las características de la columna y las propiedades del lecho que lo contiene, la malla simulada con el programa FLUENT 6.3, que se emplea para determinar las distintas dimensiones del tanque y especificar el grado de precisión que queremos establecer en el análisis de los casos, y por último la descripción de los casos llevados a estudio en el proyecto.

5.1. Modelo físico y dominio computacional

El modelo físico utilizado se basa en un lecho contenido en una columna o tanque de dos dimensiones de 2 m de altura y 0.5 m de ancho, siendo la altura de la fase densa en reposo distinta en función del caso simulado, con el fin de obtener distintos resultados y así comentar el comportamiento del lecho y compararlos. La inserción de aire se realiza desde toda la superficie inferior de forma constante a través de un plato distribuidor perforado poroso de 5 mm de ancho, con 50 agujeros de diámetro 1 mm. En el caso simulado no se ha tenido en cuenta el plato distribuidor ya que se considera la entrada de aire uniforme, por lo que su influencia no se ha estudiado en el presente proyecto. A continuación podemos observar un esquema del lecho simulado:

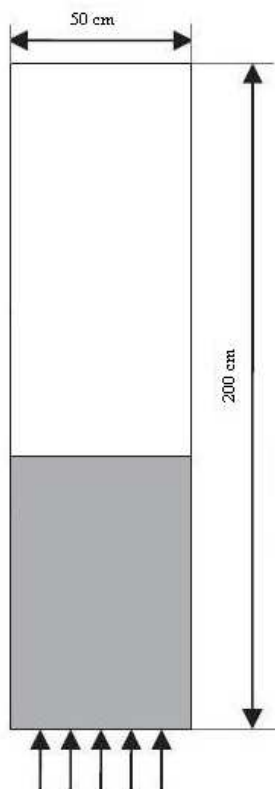


Figura 8. Esquema del lecho bidimensional simulado

En el dibujo se diferencian claramente las dos fases: una gaseosa compuesta por aire atmosférico de densidad 1.225 kg/m^3 ; y una fase sólida o densa compuesta por partículas de $700 \mu\text{m}$ de diámetro y densidad 2500 kg/m^3 , con una fracción de volumen o empaquetamiento de sólidos de 0.6 y un coeficiente de restitución, e_{ss} , de 0.9.

La siguiente tabla resume los parámetros para la simulación del modelo:

Descripción	Valor
Densidad de partículas de vidrio, ρ_p	2500 kg/m^3
Densidad del gas, ρ_g	1.225 kg/m^3
Diámetro medio de partícula, d_p	$700 \mu\text{m}$
Coeficiente de restitución, e_{ss}	0.9
Empaquetamiento inicial de sólidos	0.60
Anchura de la columna	0.50 m
Altura de la columna	2 m
Tamaño de la celda de mala	0.005 m
Condición de contorno de entrada	Velocity
Condición de contorno de salida	Outflow

Tabla 3. Resumen de los parámetros del modelo

El paso temporal elegido es de $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ con 75 iteraciones por paso de tiempo, con el fin de permitir que se estabilicen los residuos y sin embargo esto no afecte al tiempo total de procesado para cada caso.

El método de discretización utilizado fue de segundo orden para la convergencia de los términos. El error relativo entre dos iteraciones sucesivas fue especificado por el uso del criterio de convergencia de 10^{-3} para cada componente residual escalado. El algoritmo phase-coupled SIMPLE (Vasquez e Ivanov, 2000), como una extensión del algoritmo SIMPLE para flujos multifásicos, se aplica para el acople presión-velocidad (pressure-velocity coupling). La pareja de términos se tratan de manera implícita y forman parte de la matriz de solución. Este algoritmo está basado en la continuidad de volumen total y, los efectos interfaciales de esta pareja de términos son totalmente incorporados en la ecuación de corrección de presión. Las ecuaciones son resueltas empleando un método algebraico de bloque multicuadrícula o “multigrid”.

La simulación del lecho fluidizado se ha realizado mediante la utilización del software FLUENT 6.3 CFD.

5.2. Características de la malla

Para crear la malla se ha utilizado el programa GAMBIT, un software comercial compatible con el formato de FLUENT y que permite especificar la geometría, dimensiones, tipo de mallado y condiciones de contorno del modelo.

La siguiente imagen muestra el dibujo de la malla empleada en el estudio:

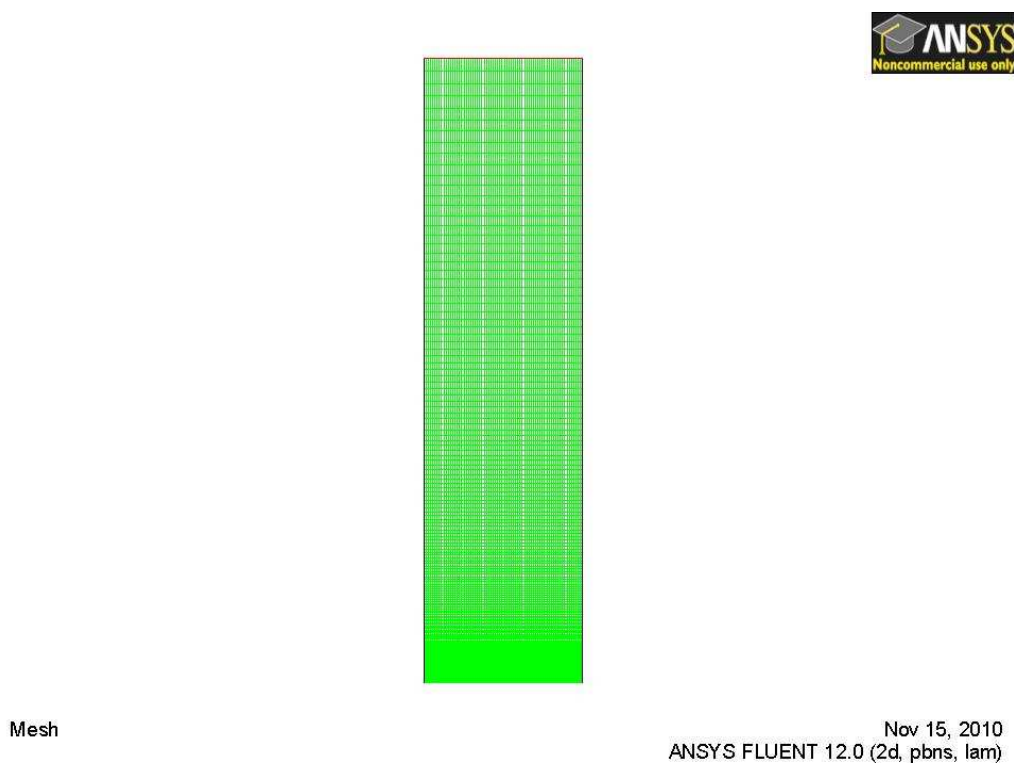


Figura 9. Dibujo de la malla simulada

La malla utilizada en el estudio de los casos para los distintos modelos de Syamlal-O'Brien y Gidaspow está compuesta de 18.072 nodos y se refinó en la parte inferior, como se puede observar en la imagen de la Figura 10, con la intención de ajustar en mayor medida los resultados obtenidos. Así, el comportamiento de las burbujas se puede esclarecer de forma más óptima en la zona baja de la columna, que es precisamente en la que se sitúa el lecho fijo y esperando que, aunque aumente el lecho se expanda, se puedan obtener unos resultados más ajustados.

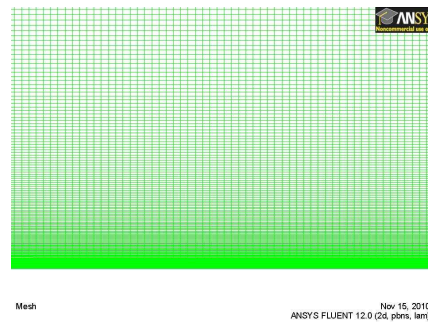


Figura 10. Ampliación de la zona inferior de la malla simulada

En la malla se han descrito una serie de condiciones de contorno, de modo que las paredes laterales se definieron como rígidas y con la condición de no deslizamiento, la superficie superior de la estructura se definió como una salida a presión ambiente de 101.325 mbar, y en cuanto a la zona inferior, es decir la zona de inyección del gas, como una entrada de velocidad fija.

5.3. Descripción de los casos

Como prelude de los casos que serán analizados posteriormente se expone el estudio realizado por el departamento de Ingeniería química y biológica de la Universidad de British Columbia en 2005, que nos ayuda a introducir el estudio hidrodinámico de un lecho fluidizado de fases gas-sólido. El modelo físico utilizado en dicho estudio es prácticamente igual al empleado en nuestro caso, salvo ciertos valores de dimensión de la columna y determinados parámetros de la fase sólida. En él se compara el comportamiento del lecho fluidizado para varios modelos teóricos y con distintos valores del coeficiente de restitución y velocidad de entrada de aire. Un resumen de los resultados gráficos de ese estudio se pueden observar en las siguientes imágenes:

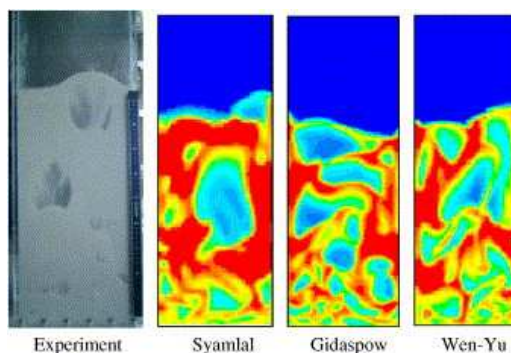


Figura 11. Imágenes del comportamiento de burbujas para distintos modelos

En ellas se puede apreciar que el comportamiento de las burbujas producidas en el lecho burbujeante para diferentes modelos es distinto. También observaremos más adelante que la velocidad de entrada y altura del lecho influirá en su comportamiento, siendo esto uno de los principales objetivos de nuestro estudio.

La intención del presente proyecto es analizar ocho casos distintos con dos modelos diferentes, el de Syamlal-O'Brien y Gidaspow, con el fin de obtener una serie de resultados en función del diámetro, altura del tanque y velocidad de las burbujas formadas en el lecho fluido, y así poder estudiar el comportamiento y características que ofrece cada modelo a la solución. Por ello, cada caso tendrá unas condiciones de velocidad de inyección del gas y altura de lecho fijo distinta, como se observa en la siguiente tabla:

	U/U_{mf}	H_{mf}/W
Syamlal-O'Brien	2 , 2.5	0.5 , 1
Gidaspow	2 , 2.5	0.5 , 1

Tabla 4. Relaciones de velocidad y altura para los distintos modelos empleados

La anchura del lecho W es 0.5 m y la velocidad de mínima fluidización U_{mf} se establece en 0.32 m/s, de acuerdo a las especificaciones descritas por diferentes autores para llevar el lecho al estado de mínima fluidización. Podemos obtener los valores necesarios para las condiciones comentadas anteriormente del siguiente modo:

Caso	Modelo	Velocidad de inyección de gas (m/s)	Altura de lecho fijo (m)
1	Syamlal-O'Brien	0.64	0.25
2	Syamlal-O'Brien	0.8	0.25
3	Syamlal-O'Brien	0.64	0.5
4	Syamlal-O'Brien	0.8	0.5
5	Gidaspow	0.64	0.25
6	Gidaspow	0.8	0.25
7	Gidaspow	0.64	0.5
8	Gidaspow	0.8	0.5

Tabla 5. Resumen de las condiciones empleadas en cada caso

Además de las propiedades de las fases sólida y gaseosa expuestas en el apartado de modelo físico, los distintos casos se realizan con un coeficiente de restitución de 0.9 y un factor de empaquetamiento de 0.6 para una simulación total de diez segundos, tiempo que se considera suficiente como para obtener los datos estadísticos de burbujas.

5.4. Análisis del código MATLAB para la detección de burbujas

Lo que se pretende en este apartado es explicar el modo en que son tratados los datos exportados de las distintas simulaciones realizadas en el código introducido en MATLAB, a razón de detectar la presencia de burbujas en el lecho y poder determinar la velocidad, altura y diámetro de las mismas.

A partir de los datos exportados en las simulaciones realizadas con el software FLUENT, que serán todos ellos de diez segundos de duración, se utiliza el programa MATLAB para analizar todos los datos y que, a través del código, se puedan resolver los distintos comandos para obtener las distintas gráficas. Es decir, todos los datos exportados de cada caso y cada 10 pasos de tiempo ($0.5 \cdot 10^{-3}$) a lo largo de los diez segundos de simulación se leen con el software MATLAB y en él se exportan los datos de concentración de sólidos en cada punto y para cada instante.

El código (que se puede consultar en el apartado número 11 de Anexos de la página 88) lee los archivos para un caso determinado y distingue entre fase densa y burbuja con un valor de corte de 0.3 para la concentración de sólidos y así almacena los datos referentes a burbujas. Determina el área de la burbuja, el diámetro de la misma, la posición “x” e “y” del centro de gravedad, el instante en el que se simulan dichos parámetros y por último la velocidad de las burbujas encontradas para esa escala de altura. A continuación pasaría al siguiente escalón de altura donde volvería a calcular todo esos valores y así sucesivamente hasta leer todos los datos a lo largo de la altura del lecho.

Por otro lado, la velocidad de las burbujas se calcula correlacionando burbujas con instante de tiempo sucesivos con las dos condiciones que se imponen en los coeficientes C_1 y C_2 del código. Una de las condiciones relaciona que las áreas de las burbujas sean similares y la otra acota el desplazamiento de la burbuja en instantes sucesivos (de tal modo que detecta de forma inmediata que se trata de la misma burbuja para un instante y el inmediatamente posterior) y sus coeficientes son respectivamente 0.4 y 0.2. Las ecuaciones que rigen estas dos condiciones son las siguientes:

$$1 - C_2 < \frac{A_1}{A_2} < 1 + C_2 \quad (5.1.)$$

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} < \frac{D_2}{2 \cdot C_1} \quad (5.2.)$$

Es importante reseñar que el diámetro D_2 es el diámetro equivalente calculado a partir del área de la burbuja como aproximación a un círculo. En la siguiente imagen se puede apreciar a modo explicativo cómo la burbuja pasa de un lugar a otro en un instante inmediatamente posterior, de tal modo que la distancia entre las mismas, y según hemos comprobado en la ecuación anterior, tendría que ser menor al diámetro dividido por dos y un coeficiente.

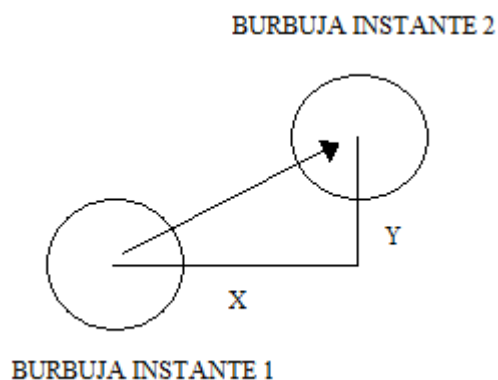


Figura 12. *Imagen explicativa de las ecuaciones*

De esta forma aseguramos que los valores son los de la misma burbuja y no de otra, cerrando así el rango de movimiento que podrían ofrecer las distintas burbujas. Se podía haber establecido cualquier otra condición más o menos restrictiva pero se considera suficiente buena la aproximación de que la distancia del centro de gravedad entre dos burbujas no supere el radio de la misma de un instante a otro.

A partir de aquí se construyen las gráficas de diámetro de burbuja frente a altura y de velocidad de burbuja frente a diámetro, calculando valores medios y desviaciones standard en distintos incrementos de altura y se pueden comparar con los modelos teóricos descritos, a fin de esclarecer el comportamiento del lecho para cada caso.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se presenta un análisis de los resultados obtenidos en la simulación con el programa FLUENT, por los que se comprueba que tras los diez segundos iniciales el lecho ya está fluidizado; además de los resultados post-procesados por medio del programa MATLAB, que nos ofrece las gráficas de diámetro de la burbuja frente a la altura y de su velocidad frente al diámetro.

Con todo ello, se comentan los resultados y se comparan entre sí para esclarecer el comportamiento del lecho con respecto al modelo empleado, además de variaciones en los valores de altura de lecho y velocidad de inyección de aire.

Es necesario recordar los valores descritos en la tabla 5 para conocer las propiedades que describen cada caso.

6.1. Análisis de gráficas

- **Caso 1**

El siguiente caso, referido a un lecho fijo de altura 0.25 m y una velocidad de entrada de 0.64 m/s (obtenido a través de la relación $U / U_{mf} = 2$) para el modelo de Syamlal-O'Brien, ofrece un comportamiento del lecho que se puede apreciar en la siguiente imagen:

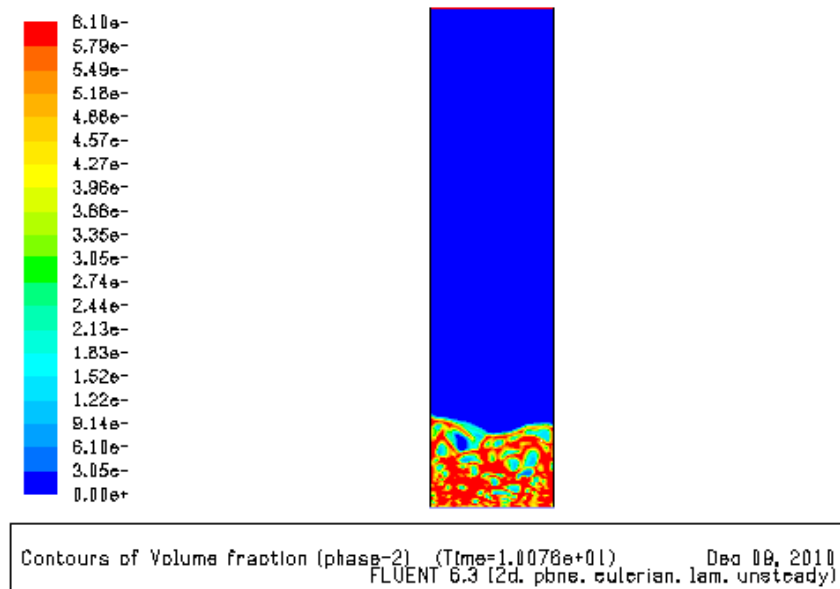
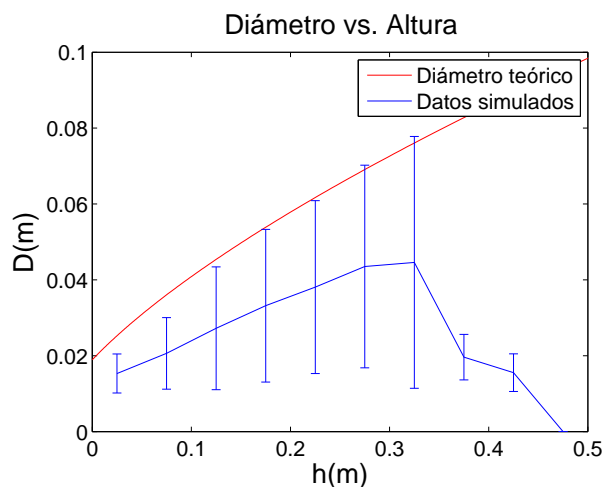


Figura 13. Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 1 de Syamlal-O'Brien

Como podemos observar en la imagen del instante final de la simulación y una vez alcanzados los diez segundos, se diferencian bastante bien la forma de las burbujas y además se comprueba que son de menor tamaño en la parte más baja de la columna que en la parte superior debido a que aumentan de tamaño a medida que ascienden por el lecho. Se muestra que la estructura de las distintas burbujas no guarda relación y no existe ningún tipo de simetría en el lecho. Las burbujas parecen tener mayor diámetro en función de la altura de la columna, incluso algunas de ellas cuando alcanzan la máxima altura del lecho explotan a tener contacto con el aire.

Si observamos la siguiente gráfica:



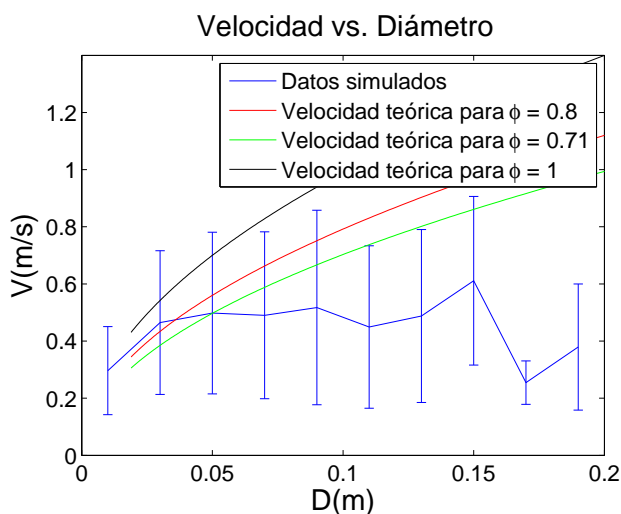
Gráfica 1. *Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 1*

En ella se aprecia una curva de color rojo que muestra la evolución del diámetro teórico calculado en la simulación por medio de la ecuación que ya describimos anteriormente, una curva de color azul que indica la media de los datos simulados contenida dentro de una serie de líneas verticales del mismo color, que se refieren a la desviación típica descrita por los datos. Gracias a la gráfica aportada se comprueba un aumento del diámetro de la burbuja, hasta una altura aproximada de 0.325 y con un valor máximo de diámetro de 0.08 m aproximadamente. La forma que describe la curva de los datos simulados tras ese punto se debe a que esa altura será prácticamente a la que llegue el lecho, debido a la expansión del mismo a efecto de su comportamiento burbujeante, por lo que no se tendrán en cuenta ya que se identifica con la superficie libre de lecho.

Se puede destacar además que la curva teórica está bastante próxima a los valores extremos de la desviación típica ofrecida por los datos simulados, lo cual es una característica de los modelos de Syamlal-O'Brien. Posteriormente comprobaremos que dicha curva entra perfectamente dentro de los valores de desviación típica para los modelos de Gidaspow.

El aumento de tamaño de las burbujas se debe, además de que el diámetro tiende a aumentar en relación al aumento de altura de la columna, a efectos propios de coalescencia entre partículas, que pueden formarse por unión con otras burbujas más grandes en su ascensión por el lecho. Después, ese valor desciende hasta llegar al valor de 0, por tanto lo que ocurra después de haber sobrepasado el máximo diámetro no se considera como datos de tipo fiable.

A continuación, analizamos la gráfica de velocidad de la burbuja frente a su diámetro:



Gráfica 2. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 1

En un primer instante parece que la curva de los datos simulados se aproxima a la curva ofrecida para una velocidad teórica de $\phi = 0.8$, pero a continuación no sigue ningún patrón de curva teórica y simplemente, a medida que aumenta el tamaño del diámetro de burbuja se obtienen distintos valores de velocidad. Esta velocidad obtenida aumenta al inicio de la altura y tras el primer estrato de altura de lecho, en nuestro caso de 0.02 m, se empieza a mantener constante hasta que al final de la simulación, sube un poco para después decender e intentar volver a retomar la anterior velocidad. Este comportamiento anómalo no tiene validez ya que se asocia a la zona libre de lecho donde hay aire y el comportamiento del mismo no es del todo fiable.

La velocidad máxima correspondiente a la burbuja de máximo diámetro observada en la anterior gráfica de 0.8 m, es de aproximadamente 0.5 m/s.

De todos modos, además del tamaño, influyen también en la velocidad de las burbujas factores como el movimiento de otras que se encuentren próximas, la distribución radial, incluso el propio flujo producido por la inyección de aire.

• Caso 2

Este caso se refiere a una altura de lecho de 0.25 m y una velocidad más elevada que el caso anterior, 0.8 m/s, que se obtiene a partir de la expresión $U / U_{mf} = 2.5$. De este modo, analizaremos en mayor profundidad la primera etapa de simulación (durante 1 segundo) para ver cómo evoluciona el lecho para una velocidad mayor:

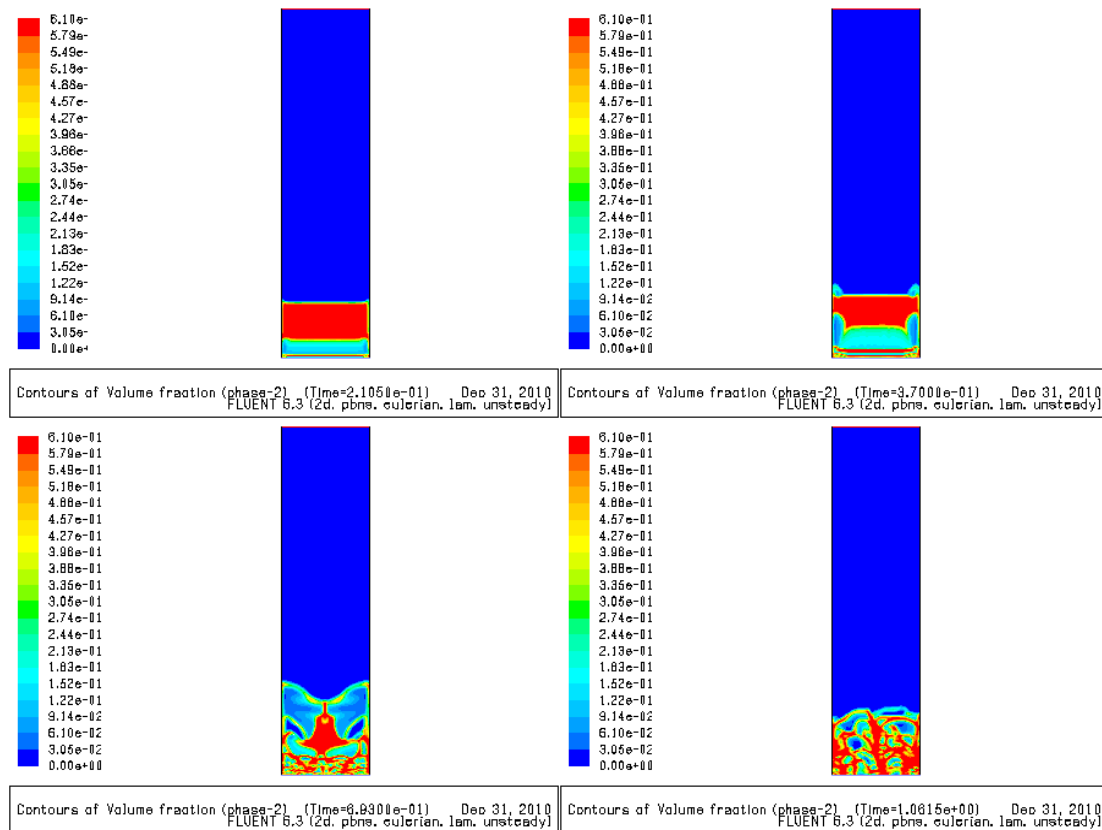


Figura 14. *Análisis de la evolución del lecho durante el primer segundo de simulación para el caso 2 correspondiente al modelo de Syamlal-O'Brien*

Se aprecia una expansión del lecho en los primeros instantes de la simulación debido a la inyección de aire por el distribuidor. A continuación, se comporta de forma simétrica con el inicio de la formación de pequeñas burbujas en la parte inferior y llegado ya a un segundo aproximadamente la forma de las burbujas se aprecia con claridad y la simetría del lecho se rompe.

Tras este breve análisis del inicio de la fluidización observamos la imagen del lecho en el momento final del proceso, donde se podrá observar la estructura de las burbujas formadas:

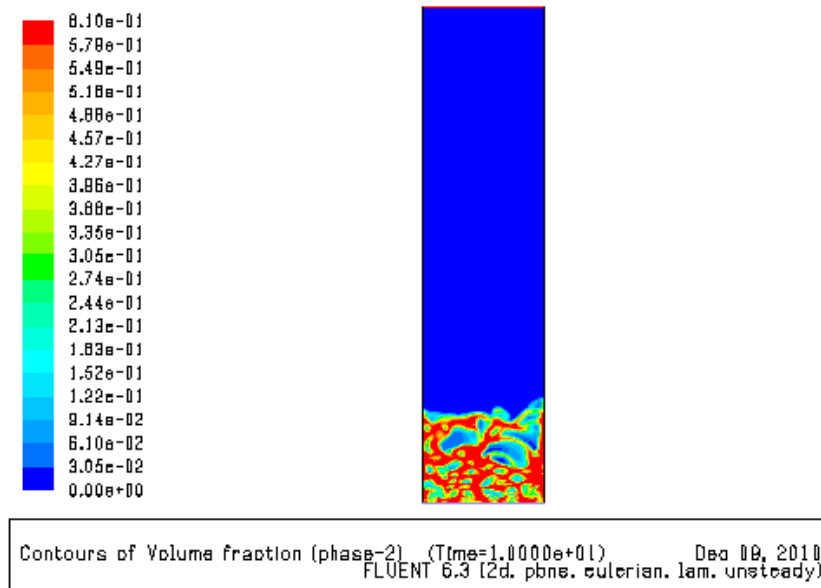
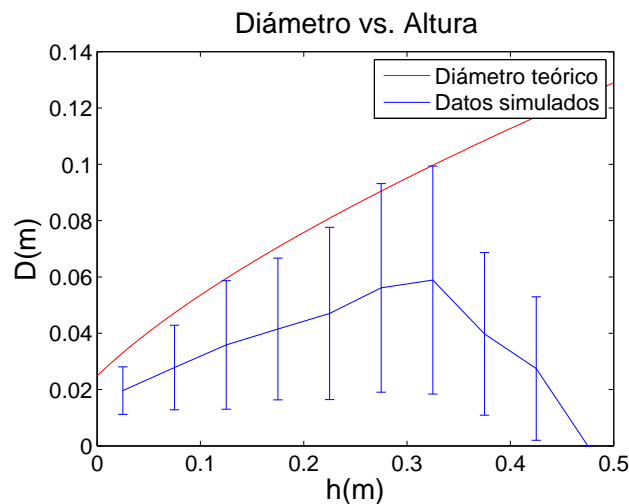


Figura 15. Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 2 de Syamlal-O'Brien

Las burbujas formadas en este instante se aprecian con total claridad, son numerosas (del mismo modo que ocurría en el caso anterior) y son más grandes en la parte superior del lecho que en la más baja. Se comprueba que el tamaño máximo alcanzado para las burbujas es mayor que al caso 1, donde la velocidad era menor, y se siguen diferenciando dos zonas en función del tamaño de burbuja.

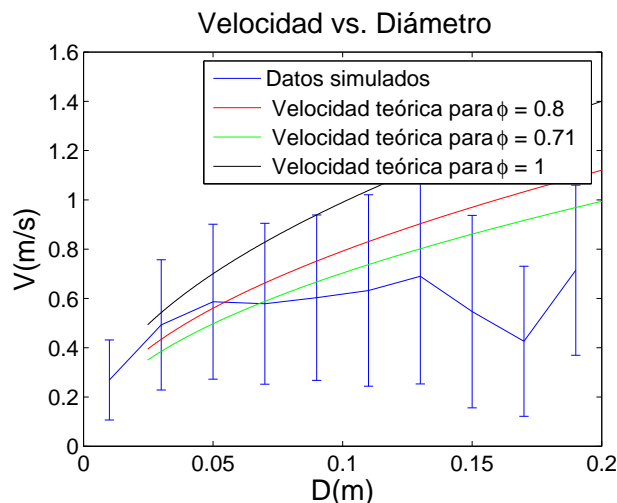
De este modo, las gráficas obtenidas se muestran a continuación:



Gráfica 3. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 2

Como es previsible el valor de diámetro asciende a lo largo de la altura del lecho y, como se comentó anteriormente, la curva del diámetro teórico se encuentra sobre los valores extremos de la desviación típica; además la media de los datos simulados, se encuentran algo alejados de la curva teórica lo que nos hace pensar que existe bastante diferencia entre el tamaño de las burbujas dentro del lecho. Lo cual se comprueba en la Figura 15 donde se diferencian como dos especie de estratos con burbujas pequeñas y más grandes.

En este caso, el diámetro de la burbuja alcanza un valor máximo aproximado de 0.1 m que resulta ser mayor al caso anterior, debido a una velocidad de entrada de aire mayor. Además, la curva de datos simulados, referida a la media de los mismos, decae alcanzado un determinado valor como ya se apreció en el caso anterior debido a que se corresponde a la zona libre de lecho.



Gráfica 4. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 2

En esta gráfica se observa que en la primera etapa de simulación y del mismo modo que en el caso 1, la curva de los datos simulados se aproxima a la curva de velocidad teórica para un $\phi = 0.8$ pero, sin embargo, después no sigue aumentando su valor de velocidad sino que ofrece una tendencia a estabilizarse. Tras esto, el valor decae y vuelve a ascender pero este comportamiento se asocia con la superficie donde se toma contacto con el aire y es por tanto descartado para el análisis.

Es decir, los valores de velocidad aumentan en primera instancia pero después se mantienen casi constantes a lo largo de la altura de lecho y para distintos diámetros de burbuja. Como el máximo diámetro obtenido en la gráfica 3 es de 0.1 m se obtiene una máxima velocidad de 0.6 m/s aproximadamente. Aunque la velocidad decae con respecto a la de entrada de aire, lo cual es normal en la simulación, se comprueba que es

mayor al caso anterior cuya velocidad de entrada también lo era, por lo que se consideran valores lógicos.

- **Caso 3**

Para este caso, que se trata de aquel cuyo lecho fluidizado es de una altura de 0.5 m y tiene una velocidad de inyección de aire de 0.64 m/s ($U/U_{mf} = 2$), se puede observar su comportamiento en el instante final de la simulación a través de la siguiente imagen:

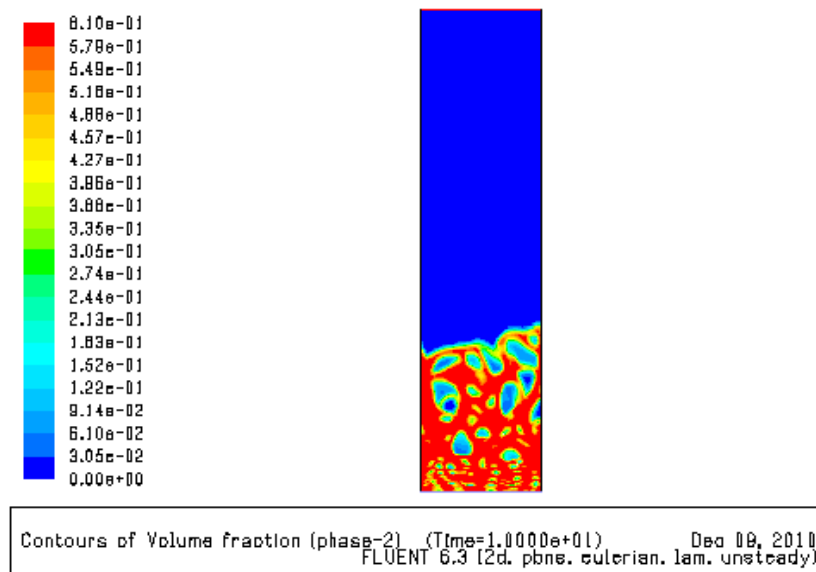
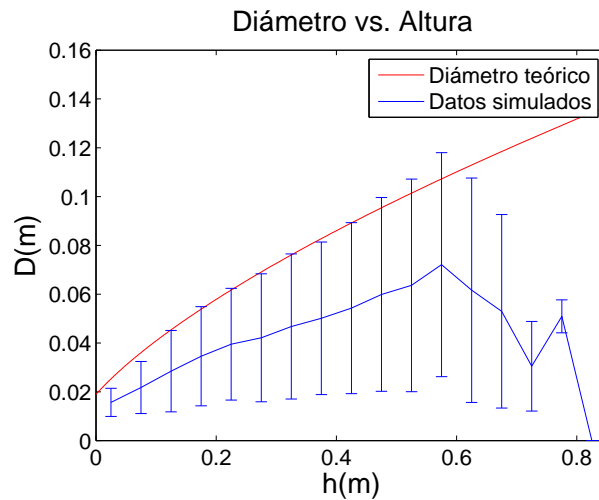


Figura 16. Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 3 de Syamlal-O'Brien

En este caso, el lecho es de mayor altura por lo que la expansión del lecho en la fluidización hace que finalmente la altura sea de casi la mitad de la columna. Las burbujas son de un tamaño bastante reducido en los niveles más bajos mientras que aumenta de diámetro de forma considerable algo más arriba y sus formas están bastante bien definidas. Algunas de ellas son más pequeñas pero sin embargo hay otras de mayor tamaño debido probablemente a la coalescencia de las mismas en su ascensión por el lecho. Del mismo modo que en el caso 2, no se guarda ningún tipo de relación de simetría en el lecho.

Por tanto, pasamos a analizar las gráficas obtenidas con el programa de simulación MATLAB:

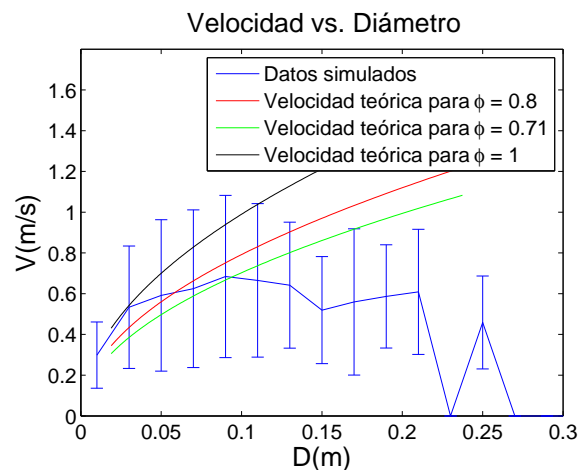


Gráfica 5. *Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 3*

El valor de diámetro asciende a medida que se asciende por el lecho y de nuevo, la curva teórica se sitúa en los valores máximos de la desviación típica de los datos simulados, además de situarse algo alejada de la curva correspondiente a la media de los mismos debido a la considerable diferencia entre las dimensiones de unas burbujas y otras.

El valor máximo alcanzado para el diámetro es de unos 0.12 m a una altura de 0.58 m. A partir de este punto se observa como la curva de datos simulados desciende y luego vuelve a ascender; pero es desde ese punto, de donde empieza a aumentar el valor de diámetro de nuevo (a una altura de 0.7 m) donde los datos ya no se hacen fiables, debido a que el lecho se ha expandido hasta ese punto y por encima hay aire.

A partir de la siguiente gráfica, analizaremos la evolución de la velocidad de la burbuja frente al diámetro:



Gráfica 6. *Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 3*

La curva de los datos simulados asciende paulatinamente de velocidad hasta un valor aproximado de diámetro de 0.08 m, donde en un principio parece que se asemeja a la curva de velocidad de $\phi = 1$ y después a $\phi = 0.71$. A continuación parece que desciende su velocidad un poco para intentar permanecer constante durante un corto recorrido hasta que finalmente decae hasta un valor 0, sube y vuelve a caer hasta cero de nuevo. Esto último, que baje a cero y vuelva a ascender se debe a que los datos no son fiables porque se encuentran en la zona libre de lecho.

A pesar de todo esto, podemos resumir su comportamiento en uno más inestable que en el expuesto para el caso anterior, aunque su tendencia después de aumentar su velocidad sea la de mantenerse constante. El máximo valor de velocidad para el diámetro máximo alcanzado de 0.12 m es de unos 0.6 m/s, que como se ha explicado es totalmente aceptado debido a que no se mantiene el valor de entrada de aire correspondiente.

• Caso 4

Para este caso, que como recordamos corresponde con una velocidad de entrada de aire de 0.8 m/s (obtenido a través de $U/U_{mf} = 2.5$) y una altura de lecho fijo, h_{mf} , de 0.5 m, se presenta el comportamiento del lecho burbujeante a los diez segundos de simulación a partir de la siguiente imagen:

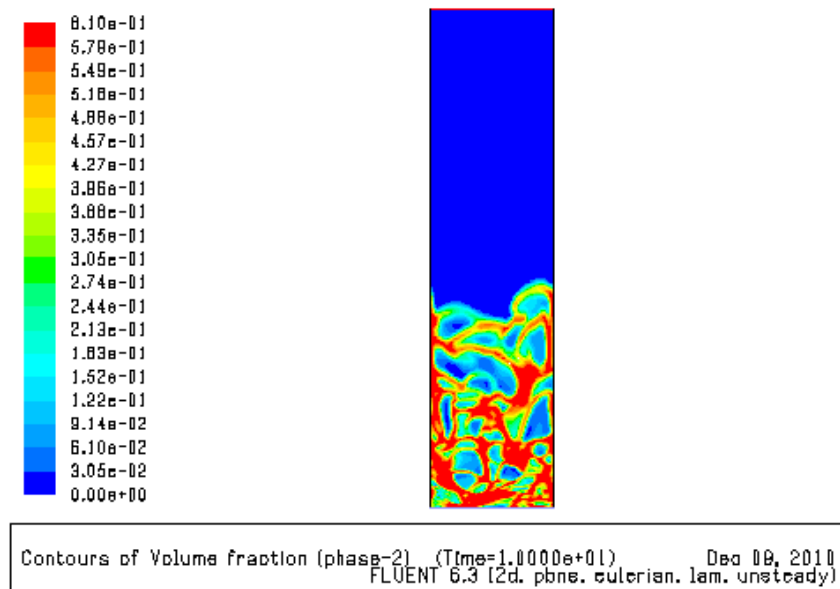
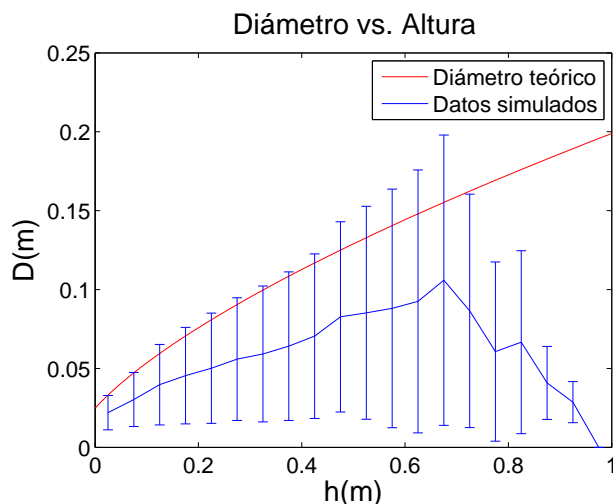


Figura 17. Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 4 de Syamlal-O'Brien

Las burbujas son bastante más grandes que en el caso anterior, además parece no haber dos especie de estratos diferenciados, uno en el que al principio las burbujas son muy pequeñas y luego más grandes, sino que la estructura de las mismas es bastante

irregular y las formadas en la parte inferior de la columna no son tan pequeñas como en el caso 3. Este hecho parece ser efecto de una velocidad de entrada superior, que forma burbujas no tan simétricas como anteriormente y mucho más grandes.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas gracias al empleo del software MATLAB, que dibujan la velocidad de la burbuja frente a su diámetro y de su diámetro frente a la altura:

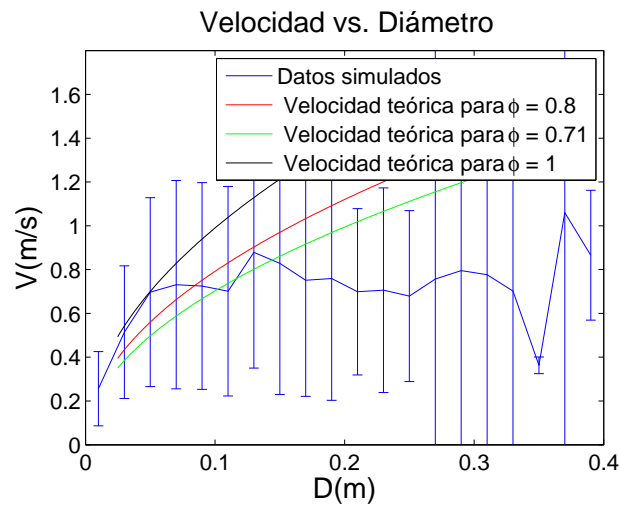


Gráfica 7. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 4

Al igual que en el resto de casos la curva describe una trayectoria ascendente y se encuentra más próxima a los valores extremos de la desviación típica de datos simulados. La media de los mismos sigue encontrándose algo alejada, característica propia del modelo de Syamlal O'Brien, y al llegar prácticamente a 0.8 m la curva vuelve a ascender y de nuevo descende. Es a partir de ese punto donde los datos no son fiables y no se consideran aceptables.

Se considera una diámetro máximo de aproximadamente 0.2 m a una altura de 0.675 m, que como se observa en la imagen del ultimo instante de simulación parece acorde con la misma.

En la siguiente gráfica se analiza el comportamiento de la velocidad de las burbujas en función del diámetro:



Gráfica 8. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 4

La curva de datos simulados se aproxima en un primer momento a la curva para $\phi = 1$ pero a continuación, y aunque sigue una tendencia aparentemente ascendente en la primera etapa, oscila y no se puede asociar a ninguna curva teórica de velocidad. Alcanzado unos 0.12 m aproximadamente, la curva describe una ligera disminución de velocidad con intención de mantenerse constante hasta los 0.32 m. Tras este punto se observa una disminución, un nuevo aumento y otra bajada, pero este comportamiento ya se asocia a hechos asociados a la zona por encima del lecho ya expandido donde hay aire.

Por tanto, para el diámetro máximo alcanzado de 0.2 m se obtiene una velocidad de prácticamente 0.7 m/s.

- **Caso 5**

El siguiente caso 5 corresponde a aquel cuya velocidad de entrada de aire es 0.64 m/s, obtenido de la relación $U / U_{mf} = 2$, y un lecho fluidizado de altura 0.25 m, para el modelo de Gidaspow (que pertenece al mismo modelo que el resto de casos que se analizarán posteriormente). Por medio de la siguiente imagen extraída de la simulación con FLUENT podemos comentar su comportamiento:

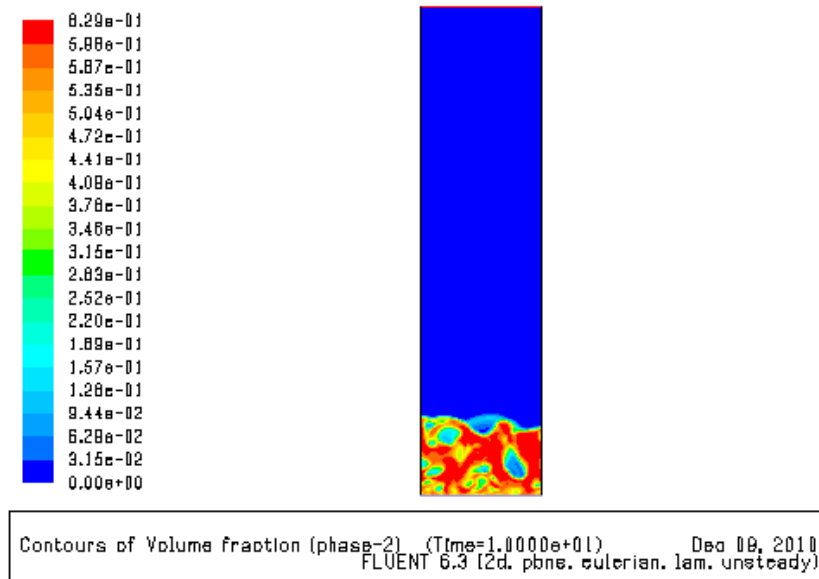
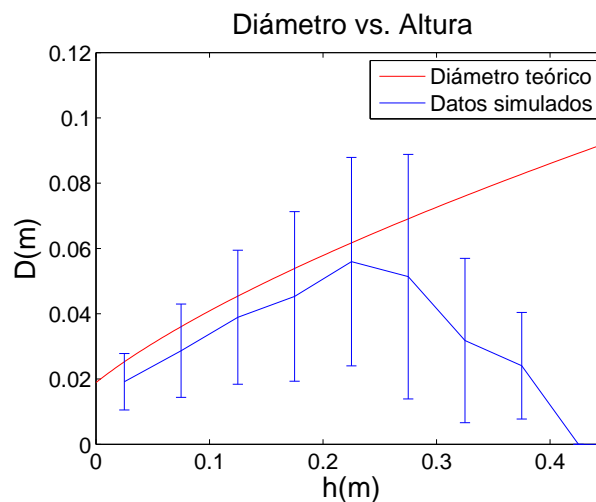


Figura 18. Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 5 de Gidaspow

El tamaño de las burbujas es más pequeño en la parte inferior de la columna y después aparece alguna más grande en la parte alta, pero de forma dispersa. Si observamos la Figura 13 correspondiente al caso 1, que guarda las mismas condiciones de velocidad de entrada y altura de lecho y tan sólo cambia el modelo de simulación, se puede comprobar que ahora la presencia de burbujas es menor pero sí parece que sean un poco mayores en cuanto a sus dimensiones. Sin embargo, continuamos analizando las gráficas para confirmar todas estas primeras impresiones.

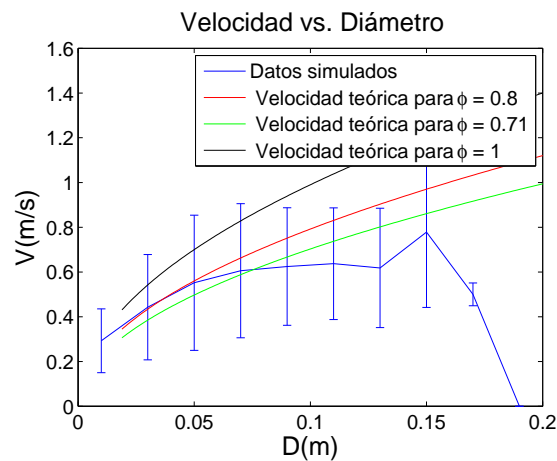
Aún así todas las comparaciones entre los modelos y los distintos casos se expondrán en el posterior punto 6.2., donde se intentarán establecer los criterios que diferencian unas condiciones con otras.



Gráfica 9. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 5

En este caso, se puede observar que la curva de la media de datos simulados se aproxima más a la ofrecida por el diámetro teórico, lo que indica que el crecimiento de las burbujas es más uniforme que para los casos de Syamlal-O'Brien. Se alcanza un diámetro máximo de 0.09 m a una altura de lecho de 0.225 m, y tras ese punto la curva comienza a descender hasta cero, que será el momento en que ya no haya burbujas porque se encuentra con la zona donde hay aire. Es importante destacar que la curva de diámetro teórico se encuentra dentro de los límites de la desviación típica de los datos simulados, que se observaba en los casos de Syamlal-O'Brien y se situaba prácticamente en los extremos de los mismos.

Observando la siguiente gráfica se puede determinar la velocidad de la burbuja de mayor diámetro y su comportamiento con respecto a los modelos teóricos facilitados:



Gráfica 10. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 5

La curva que describen los datos simulados ofrece una tendencia ascendente proporcional al aumento de diámetro de burbujas, hasta los 0.15 m. Si se analiza con mayor precisión, en primer lugar aumenta su velocidad acorde con la curva teórica para $\phi = 0.8$ pero a continuación se mantiene casi constante para después volver a aumentar y comenzar a disminuir su velocidad, momento a partir del cual se asocia con la zona libre de lecho, donde hay aire y no se pueden considerar aceptables sus resultados. En general y observando la trayectoria total de la curva, se puede asemejar su comportamiento en con el de la curva de velocidad teórica para $\phi = 0.71$.

- **Caso 6**

El presente caso se corresponde con una velocidad de entrada de aire superior al anterior caso 5, de 0.8 m/s (que se obtiene de $U/U_{mf} = 2.5$), y de la misma altura de lecho fijo (0.25 m):

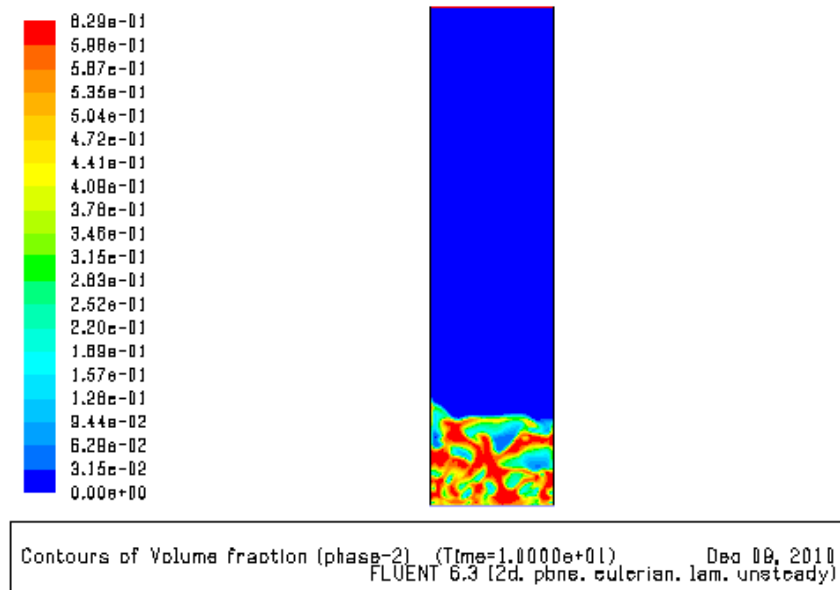
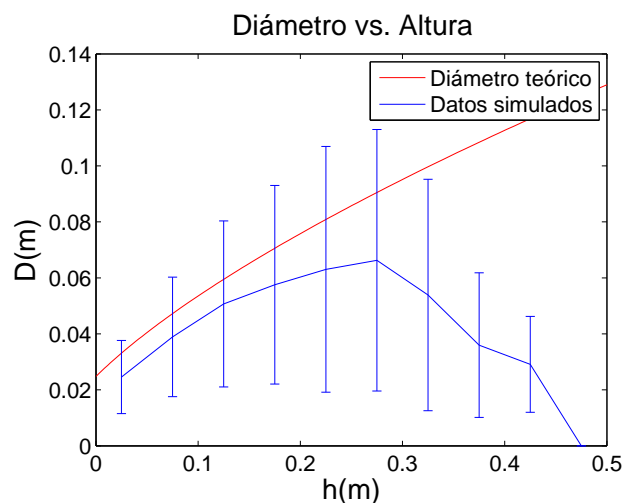


Figura 19. Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 6 de Gidaspow

Para el último instante de tiempo de simulación que se observa en la imagen se pueden extraer diferentes características de comportamiento. En primer lugar, se observa que la formación de burbujas es mayor que para el caso anterior debido a una mayor velocidad de inyección y que, por supuesto, las burbujas más pequeñas se encuentran en la zona inferior de la columna mientras que en la superior aumentan de tamaño. Sin embargo, a diferencia del caso 5 comentado anteriormente, la irregularidad de la forma de las burbujas se hace presente con mayor claridad; lo que hace pensar que su comportamiento es más turbulento y rápido.

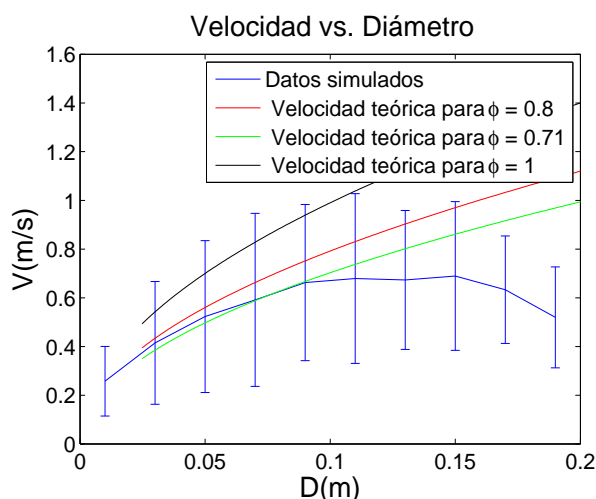
En la siguiente gráfica se analiza la curva de Diámetro vs. Altura:



Gráfica 11. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 6

Del mismo modo que en el caso anterior de Gidaspow, la curva referida a la media de los datos simulados se aproxima bastante bien a la del diámetro teórico y ésta se encuentra dentro de los límites de desviación típica de los datos, además alcanza una altura de 0.275 m de altura y empieza a descender hasta el valor 0, donde se toma contacto con el aire y no existe lecho. El máximo diámetro es de aproximadamente 0.11 m alcanzado en la altura comentada anteriormente. Por tanto, parece ser una característica común a los casos de Gidaspow que los datos simulados se aproximen bastante a la curva teórica aunque se continuará analizando para esclarecer si esto se cumple siempre.

A continuación, analizamos la gráfica de velocidad de la burbuja frente a su diámetro:



Gráfica 12. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 6

En este caso, los datos simulados aumentan su velocidad proporcionalmente al tamaño del diámetro de burbuja de forma bastante aproximada a la ofrecida por la curva de velocidad teórica con $\phi = 0.71$, después parece mantenerse constante y por último comienza a descender. El diámetro máximo de 0.11 que se obtuvo en la gráfica anterior corresponde a una velocidad de aproximadamente 0.7 m/s, lo cual es totalmente lógico debido a que la velocidad de entrada de aire de 0.8 m/s no se mantiene a medida que se asciende por el lecho debido a diferentes factores, como la resistencia de las partículas, la formación de burbujas mayores por coalescencia, etc.

• Caso 7

Para el presente caso, que recordamos tiene una velocidad de entrada de aire de 0.64 m/s obtenido a través de la expresión $U / U_{mf} = 2$, y una altura de lecho fijo de 0.5 m, se observa el comportamiento de las burbujas formadas por medio de la siguiente imagen:

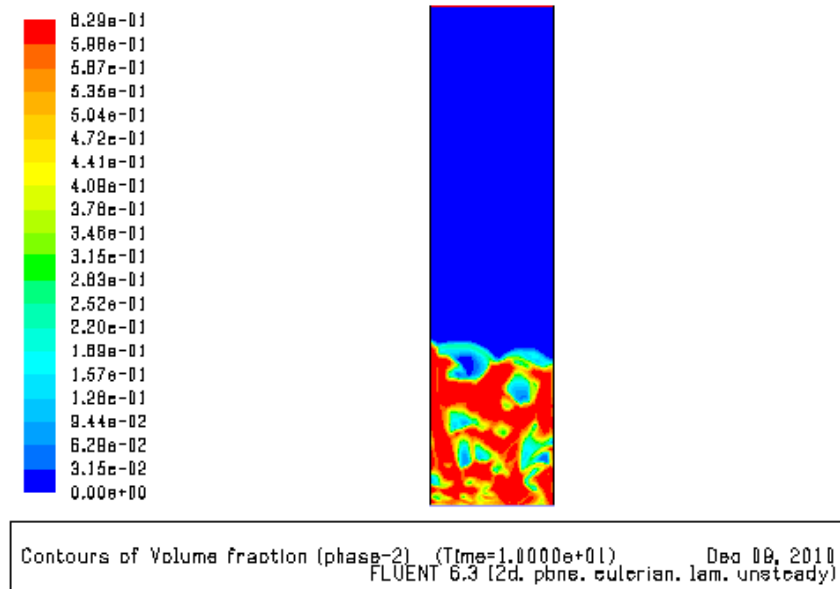
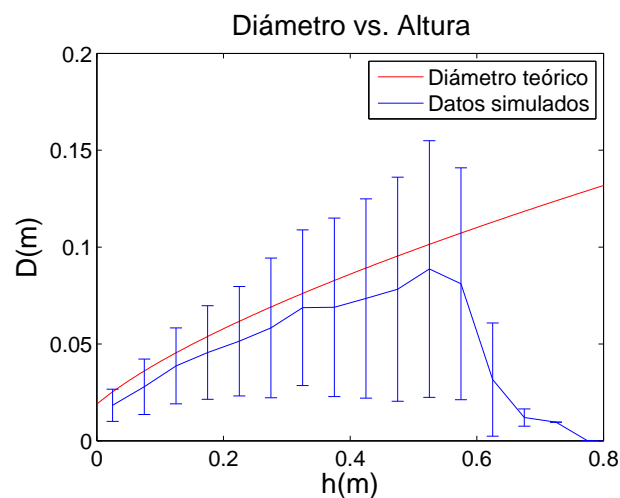


Figura 20. Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 7 de Gidaspow

Se observan burbujas de diferentes tamaños a lo largo de la altura del lecho, además algunas de menor tamaño se encuentran en la zona más alta del mismo y no se diferencian distintos estratos. Otra característica que se ha podido plasmar en la imagen es la de una burbuja bastante bien definida en la zona superior derecha, que se encuentra a punto de tener contacto con el aire exterior y que por tanto explotará; como ha ocurrido en la zona superior izquierda, donde se intuye que el espacio libre de lecho se debe a la erupción de una de las burbujas.

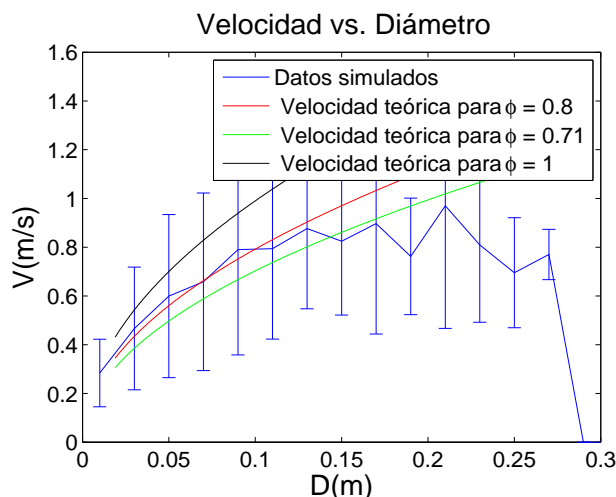
A continuación, se analizan las siguientes gráficas de diámetro frente a altura y de velocidad frente a diámetro:



Gráfica 13. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 7

La resolución de la gráfica muestra una curva para la media de los datos simulados muy aproximada a la descrita por el diámetro teórico, por lo que se consideran unos resultados bastante buenos y cuyo aumento de dimensiones de burbuja es regular y no se producen dos estratos con diferentes tamaños. La curva de datos simulados aumenta su diámetro hasta una altura de 0.525 y una vez alcanzado este punto decae de nuevo pero, como se ha explicado en anteriores casos, los datos tras ese punto ya no resultan del todo fiables, por lo que se descartan para su análisis. Por último, cabe destacar que el máximo diámetro alcanzado es de 0.15 m y que la curva teórica se encuentra perfectamente dentro de los límites descritos por la desviación típica de los datos simulados, que sin duda y como hemos estado recopilando en los demás casos resulta ser una característica propia del modelo de Gidaspow.

Por último, se analiza la siguiente gráfica:



Gráfica 14. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 7

Los valores de velocidad ascienden proporcionalmente con el diámetro de burbuja, en un primer momento la curva ofrece un comportamiento bastante cercano al de la curva de velocidad para $\phi = 0.8$ pero a continuación sufre una serie de picos de aumento y disminución de velocidad que lo alejan de la tendencia de dicha curva teórica para después, llegados aproximadamente a 0.25 m comienza a descender, fruto del contacto con la zona libre de lecho.

• Caso 8

En este lugar, se analiza el caso modificando los valores de altura de lecho y entrada de aire. Se recuerda que su velocidad es de 0.8 m/s (obtenida gracias a la relación $U/U_{mf} = 2.5$), mientras que la altura de lecho fijo simulada es de 0.5 m. Del mismo modo en que se hizo el caso 2, se analiza la evolución del lecho en la primera etapa de

simulación, durante un segundo, para observar su comportamiento para una velocidad elevada y en este caso con una altura de lecho fijo superior al caso ya analizado:

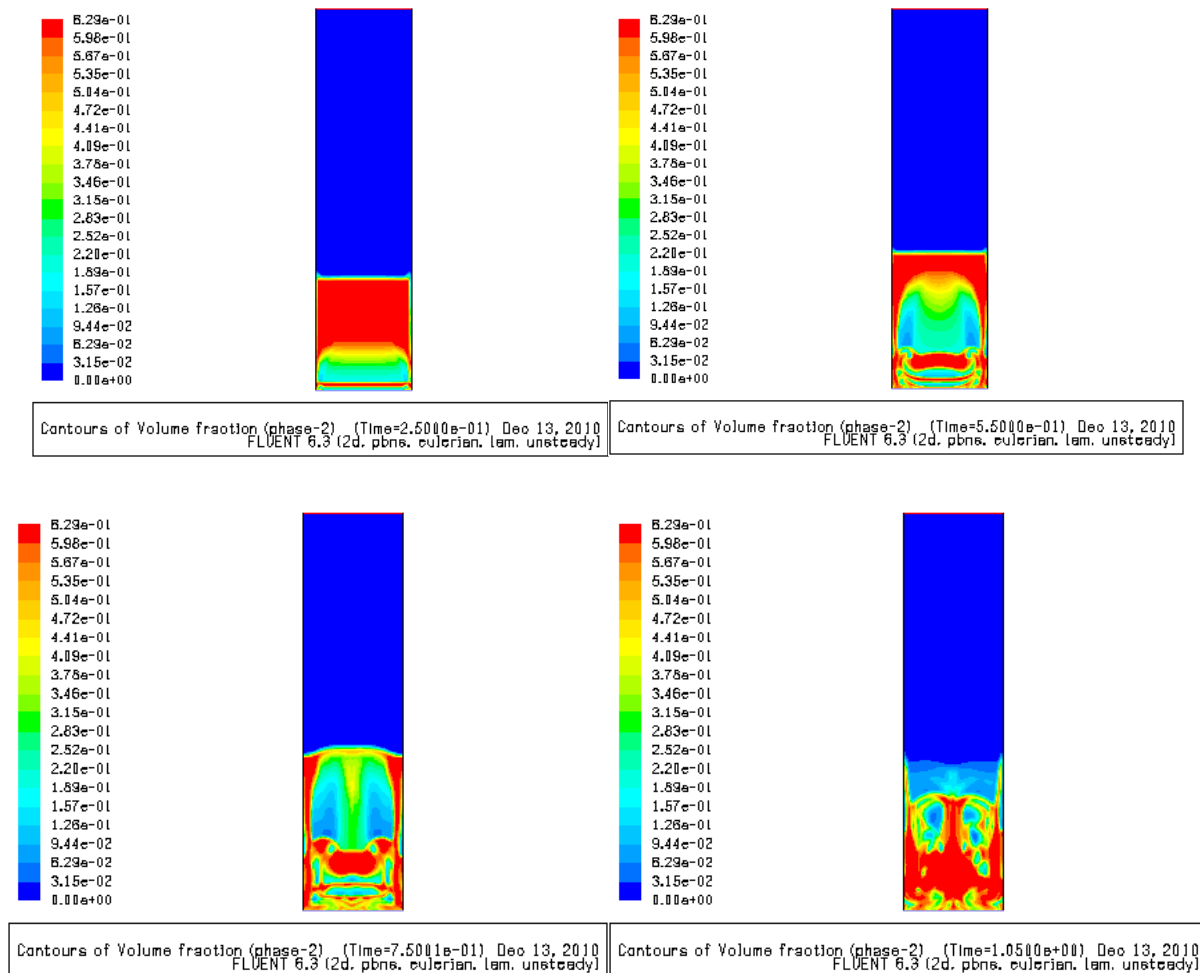


Figura 21. *Análisis de la evolución del lecho durante el primer segundo de simulación para el caso 8 correspondiente al modelo de Gidaspow*

Del mismo modo en que se comportaba el caso 2, en el que se analizaba la evolución del lecho a lo largo del primer segundo de simulación, el propio lecho se empieza a expandir de forma simétrica pero la morfología resulta totalmente distinta al caso comentado. Aun así se expande y aunque pasado un segundo no se puede apreciar con total claridad la formación de burbujas, sí parece que empiezan a formarse. El lecho que antes se había expandido hasta cierta altura baja hasta alcanzar una menor a la de los primeros instantes y su simetría se mantiene. Por tanto, parece que para el presente caso con el modelo de Gidaspow se necesita algo más de un segundo para observar las burbujas perfectamente formadas.

Sin embargo, a partir de la siguiente imagen tomada cuando se alcanzan los diez segundos se pueden observar las burbujas que se han formado en el lecho:

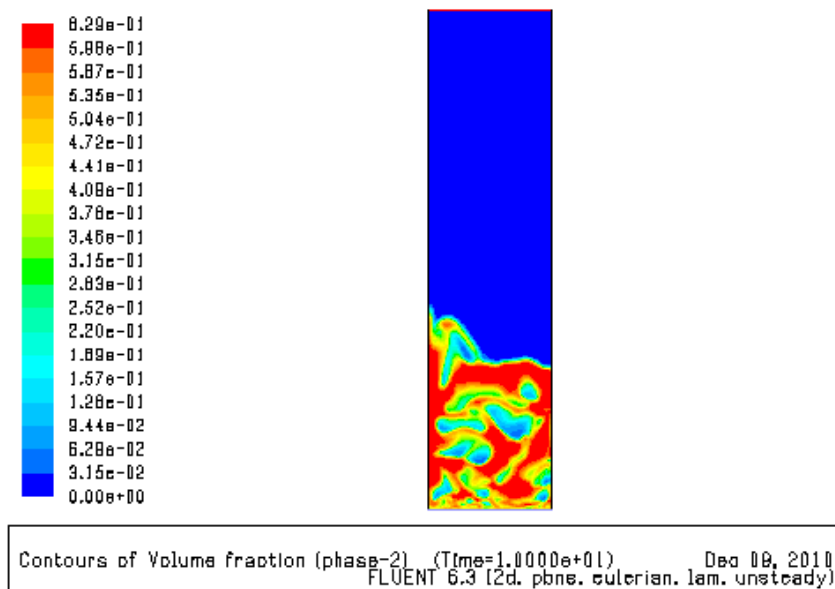
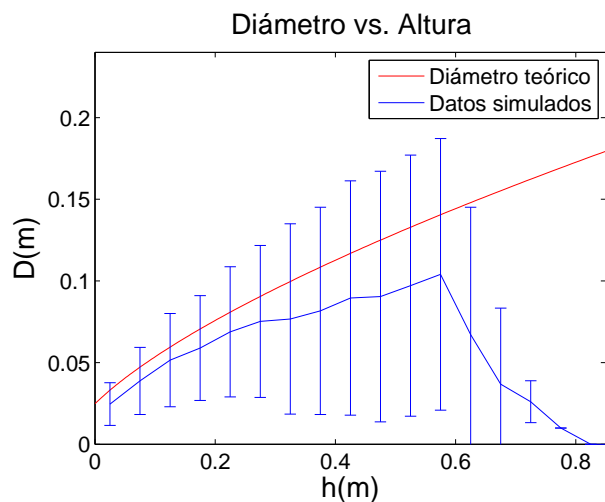


Figura 22. Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 8 de Gidaspow

Las burbujas obtenidas en la simulación son bastante grandes debido a la elevada velocidad de inyección de aire y mayores al caso anterior, también son bastante irregulares y achatadas, pero esto parece ser una consecuencia de aplicar el modelo de Gidaspow ya que en los anteriores casos que emplean este modelo sucede de forma similar. Otra característica que muestra la imagen es la de la presencia de las burbujas en la parte central del lecho, evitando que ocupen la zona más próxima a las paredes laterales. Por último cabe reseñar la forma que ofrece la posible explosión de una de las burbujas en la esquina lateral izquierda del propio lecho; éste alcanza una altura superior al resto debido a que la explosión de la burbuja en dicho instante y en contacto con el aire produce una expulsión del material del lecho por encima de la altura del lecho expandido.

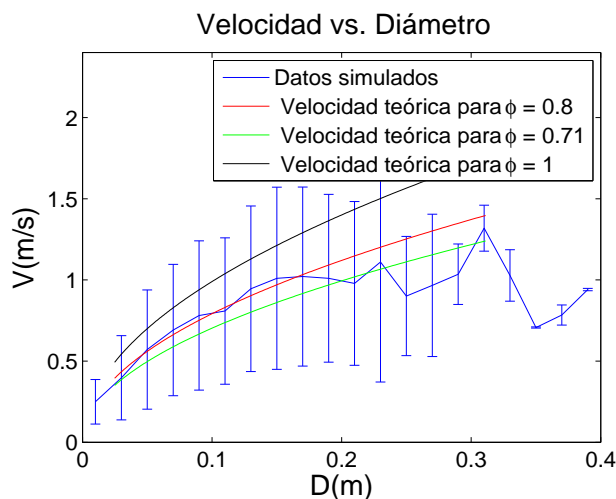
Se analiza el comportamiento del caso 8 a partir de las gráficas obtenidas del post-proceso con MATLAB:



Gráfica 15. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 8

Los datos describen un aumento en las dimensiones de las burbujas a medida que se asciende por el lecho, obteniendo un valor máximo de diámetro de aproximadamente 0.18 m a una altura de 0.575, lo cual resulta aceptable observando la imagen anterior facilitada por el programa FLUENT. Llegado a esa altura determinada la media de datos sobre una disminución en las dimensiones de burbujas hasta cero, como cabía de esperar. La media de los datos simulados vuelve a situarse bastante próxima a la curva del diámetro teórico y además, cabe reseñar que la dicha curva se encuentra perfectamente dentro de los límites de la desviación típica de los datos.

A continuación se muestra la gráfica de velocidad vs. diámetro:



Gráfica 16. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 8



En esta gráfica la curva de los datos simulados ofrece una tendencia ascendente en cuanto a velocidad y proporcional al aumento de dimensiones de burbuja. Al principio parece asemejarse bastante a la curva de velocidad teórica de $\phi = 0.8$ hasta casi los 0.2 m, después se mantiene constante durante un pequeño instante, sufre un pico de aumento de velocidad y por último vuelve a aumentar y disminuir. Por tanto, se muestra un comportamiento más irregular que el que se ha descrito en los casos 5 y 6 del modelo de Gidaspow. En la última etapa y a partir de 0.3 m la curva desciende y vuelve a aumentar y parece ser consecuencia del contacto con el aire en algunos puntos fuera del lecho.

Para el diámetro máximo de 0.18 m obtenido en la gráfica de diámetro vs. Altura podemos asociar su máxima velocidad en la presente gráfica con un valor aproximado de 0.8 m/s.

6.2. Comparación de resultados

En este apartado se procede a comentar y comparar todos los resultados que se han obtenido y han sido descritos en el apartado anterior a fin de esclarecer si existen determinados patrones en función del modelo empleado en la simulación o en los parámetros de velocidad de entrada de aire y altura de lecho fijo. Para ello se muestra una tabla con un resumen de las características de cada caso en particular:

Caso		Imagen del instante de diez segundos	Gráfica diámetro vs. altura	Gráfica velocidad vs. diámetro
1		Muchas burbujas: las más pequeñas abajo y grandes arriba	Curva de diámetro teórico situada en los extremos de los valores de desviación típica de datos simulados y curva de media de los datos alejada de la curva anterior	Curva de datos simulados ascendente al principio acorde con $\phi = 0.8$, después ofrece tendencia constante
		$U = 0.64 \text{ m/s}$ $h_{mf} = 0.25 \text{ m}$	$d_{m\acute{a}x} = 0.08 \text{ m}$ $h_{m\acute{a}x} = 0.325 \text{ m}$	
2		Burbujas más grandes que el caso 1 pero se diferencian 2 zonas en cuanto al tamaño de burbuja	Curva de diámetro teórico situada en los extremos de los valores de desviación típica de datos simulados y curva de media de los datos alejada de la curva anterior	Curva de datos simulados ascendente al principio acorde con $\phi = 0.8$, después ofrece tendencia constante
		$U = 0.8 \text{ m/s}$ $h_{mf} = 0.25 \text{ m}$	$d_{m\acute{a}x} = 0.1 \text{ m}$	

			$h_{m\acute{a}x} = 0.325 \text{ m}$	
3	$U = 0.64 \text{ m/s}$ $h_{mf} = 0.5 \text{ m}$	Burbujas muy pequeñas abajo y grandes en la zona superior	<p>Curva de diámetro teórico situada en los extremos de los valores de desviación típica de datos simulados y curva de media de los datos alejada de la curva anterior</p> $d_{m\acute{a}x} = 0.12 \text{ m}$ $h_{m\acute{a}x} = 0.58 \text{ m}$	Curva de datos simulados ascendente al principio acorde con $\phi = 1$, después ofrece tendencia a estabilizarse
4	$U = 0.8 \text{ m/s}$ $h_{mf} = 0.5 \text{ m}$	Estructura irregular con burbujas bastante grandes y en la zona inferior de mayor tamaño que el caso anterior	<p>Curva de diámetro teórico situada en los extremos de los valores de desviación típica de datos simulados y curva de media de los datos alejada de la curva anterior</p> $d_{m\acute{a}x} = 0.2 \text{ m}$ $h_{m\acute{a}x} = 0.675 \text{ m}$	Curva de datos simulados ascendente al principio acorde con $\phi = 1$, después ofrece tendencia a estabilizarse
5	$U = 0.64 \text{ m/s}$ $h_{mf} = 0.25 \text{ m}$	Aparecen menos cantidad de burbujas pero se diferencian las de menor y mayor tamaño	Curva de diámetro teórico situada dentro de los límites de los valores de desviación típica de datos simulados y curva de media de los datos próxima a la curva	Curva de datos simulados ascendente al principio y semejante a $\phi = 0.8$, después forma constante y disminución de su velocidad

			anterior $d_{m\acute{a}x} = 0.09m$ $h_{m\acute{a}x} = 0.225 m$	
6	$U = 0.8 m/s$ $h_{mf} = 0.25 m$	Burbujas más grandes que el caso anterior de estructura irregular y forma achatada	Curva de diámetro teórico situada dentro de los límites de los valores de desviación típica de datos simulados y curva de media de los datos próxima a la curva anterior $d_{m\acute{a}x} = 0.11 m$ $h_{m\acute{a}x} = 0.275 m$	Curva de datos simulados ascendente al principio y semejante a $\phi = 0.71$, después forma constante y disminución de su velocidad
7	$U = 0.64 m/s$ $h_{mf} = 0.5 m$	Forma menos achatada pero con disposición irregular de burbujas	Curva de diámetro teórico situada dentro de los límites de los valores de desviación típica de datos simulados y curva de media de los datos próxima a la curva anterior $d_{m\acute{a}x} = 0.15 m$ $h_{m\acute{a}x} = 0.525 m$	La curva de datos simulados ofrece una tendencia ascendente próxima a $\phi = 0.8$ y después sus valores de velocidad van decayendo con forma irregular (varios picos)
8	$U = 0.8 m/s$ $h_{mf} = 0.5 m$	Mayor número de burbujas que el caso 7, de forma achatada e	Curva de diámetro teórico situada dentro de los límites de los	La curva de datos simulados ofrece una tendencia ascendente

		irregular con la peculiaridad de su disposición en torno al centro del tanque	valores de desviación típica de datos simulados y curva de media de los datos próxima a la curva anterior $d_{m\acute{a}x} = 0.18 \text{ m}$ $h_{m\acute{a}x} = 0.575 \text{ m}$	próxima a $\phi = 0.8$ y después sus valores de velocidad van decayendo con forma irregular (varios picos)
--	--	---	--	--

Tabla 6. Resumen de las características de cada caso

7. CONCLUSIONES

En este apartado se procede a establecer las distintas conclusiones que se han podido establecer en función del análisis de los resultados que se han obtenido en el anterior punto de resultados obtenidos y comparación de los mismos, con el fin de proporcionar una visión clara y concisa de lo que ha supuesto en líneas generales el experimento con los distintos casos que forman el objeto de estudio del presente proyecto.

En primer lugar, se puede determinar que en los casos cuyo modelo empleado ha sido Syamlal-O'Brien parece haber un número mayor de burbujas para distintas velocidades y alturas de lecho fijo que para los del modelo de Gidaspow, pero este fenómeno tan sólo es apreciable a través de las imágenes obtenidas y de forma visual, ya que no se tienen datos que lo confirmen. Además se ha podido observar que para una velocidad de entrada de aire mayor las dimensiones de burbujas normalmente también eran mayores para ambos casos; este hecho sin embargo, sí se puede corroborar con los datos obtenidos de las gráficas, que demuestran además que las burbujas para los casos de Syamlal-O'Brien son más pequeñas y más lentas.

En el modelo de Gidaspow, sin embargo, la estructura de las burbujas es bastante irregular y normalmente con formas achatadas, hecho que del mismo modo que se describió anteriormente tan sólo se puede apreciar de forma visual y sin datos para constatarlo. Es necesario indicar que en algunas imágenes aparecen burbujas alargadas y se debe a efectos de la pared y a la coalescencia con otras burbujas.

En cuanto a las gráficas de diámetro vs. altura, se pueden extraer dos criterios bastante bien diferenciados en cuanto al modelo de simulación empleado. Para Syamlal-O'Brien se observa que la curva teórica se encuentra dibujada en los valores más extremos de la desviación típica de los datos simulados, además la curva de dichos datos se encuentra ligeramente alejada de la curva teórica. Sin embargo todas siguen una tendencia ascendente de forma que su diámetro aumenta en función de la altura del lecho y también, en la última etapa de la simulación la media de los datos disminuye su diámetro debido a que se aproximan a la zona libre de lecho, donde se toma contacto con el aire, y es por ello que no se consideran fiables sus resultados.

Tras un análisis de las gráficas de velocidad vs. diámetro se pueden extraer diferentes conclusiones: se observa que para los casos de Syamlal-O'Brien la curva describe una tendencia ascendente al principio bastante próxima a una curva de velocidad teórica con $\phi = 0.8$ para los casos cuya altura de lecho es 0.25 m, y próxima a $\phi = 1$ para aquellos con altura de 0.5 m, pero después tiende a estabilizar los valores de velocidad a medida que aumenta el diámetro de burbuja. Sin embargo, para el modelo de Gidaspow, las diferencias entre los casos 5 y 6 con los 7 y 8 se hacen mayores (es decir, aquellos que su altura de lecho fijo es 0.25 m y 0.5 m respectivamente). Para los casos 5 y 6 se dibuja una curva de datos simulados con tendencia ascendente en la



primera etapa próxima a las curvas de velocidad teórica con $\phi = 0.71$ y $\phi = 0.8$, y durante un corto periodo de espacio, para después estabilizar los valores de velocidad y finalmente sufrir una clara disminución de los mismos. Por otro lado, en los casos 7 y 8 se observa un aumento de velocidad de forma proporcional al de diámetro de burbujas y próximo a la curva teórica con $\phi = 0.8$ aunque sí cabe destacar que se hace de forma más irregular que en los casos cinco y seis, sufriendo picos de subida.

Por último, es necesario reseñar que tras los distintos análisis de gráficas obtenidos tras el post-proceso con el software MATLAB y como se ha podido comprobar en los mismos, se puede llegar a la conclusión de que el modelo de Gidaspow se aproxima de una manera más óptima a los resultados teóricos que los casos relacionados con el modelo de Syamlal-O'Brien.

8. TRABAJOS FUTUROS

En base a la línea de investigación que se ha seguido a lo largo del presente proyecto se han podido establecer una serie de trabajos que podrían proponerse en un futuro para aumentar así el campo de estudio en el tema de los lechos fluidizados, sus parámetros y consecuencias.

Algunos de ellos, que se han podido establecer durante la realización del proyecto y otros que se consideran factibles para un futuro, se resumen en los siguientes puntos descritos a continuación:

- Estudio de la influencia en los resultados de las simulaciones y post-proceso de los datos por la introducción de un distribuidor de aire en la base del depósito.
- Estudio de los casos realizados en el presente proyecto para diferentes velocidades y propiedades del lecho distintas.
- Estudio de las aplicaciones sobre el lecho empleado para una simulación 3D de FLUENT.
- Simulación numérica para la determinación de las velocidades de mínima fluidización para cada modelo.

9. REFERENCIAS

1. Tutoriales de ayuda de FLUENT. Fluent 6.3 User's Guide.
2. D. Kunni y O. Levenspiel. 1991. "Fluidization engineering". Ed. Butterworth-Heinmann, Boston. Second edition.
3. M.J. Glukman, J. Yerushalmi y A.M. 1976. "Fluidization technology". Second edition. Ed. McGraw-Hill.
4. G. Geldart y A. R. Abrahamsen. 1980. "Fluidization III". Ed Plenum.
5. C. Y. Wen y Y. H. Yu. 1966. A.I.Ch.E. Journals Num. 12.
6. Ding, J., Gidaspow, D. 1990. "A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow". A.I.Ch.E. Journal 36.
7. F. Taghipour, Naoko Ellis y Clayton Wong. 2005. "Experimental and computational study of gas-solid fluidized bed hydrodynamics". Ed. Elsevier. Chemical engineering Science 60.
8. Laihong Shen, F. Johnsson y Bo Leckner. 2004. "Digital image analysis of hydrodynamics two-dimensional bubbling fluidized beds". Ed. Elsevier. Chemical Engineering Science 59.
9. Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N., 2002. Transport Phenomena. Second ed. Wiley, New York.
10. Clift, R., Weber, M.E., Grace, J.R., 1978. Bubbles, Drops, and Particles. Academic Press, New York.
11. Darton, R.C., LaNeuze, R.D., Davidson, J.F., Harrison, D., 1977. Bubble growth due to coalescence in fluidised beds. Transactions of the Institution Chemical Engineering 55, 274.
12. Ding, J., Gidaspow, D., 1990. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow. A.I.Ch.E. Journal 36, 523-538.
13. Gera, D., Gautam, M., Tsuji, Y., Kawaguchi, T., Tanaka, T., 1998. Computer simulation of bubbles in large-particle fluidized beds. Powder Technology 98, 38-47.
14. Gidaspow, D., 1994. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions. Academic Press, San Diego.



15. Gilberston, M.A., Yates, J.G., 1996. The motion of particles near a Hubble in a gas-fluidized bed. *Journal of Fluid Mechanics* 323, 377-385.
16. Grace, J.R., Taghipour, F., 2004. Verification and validation of CFD models and dynamic similarity for fluidized beds. *Powder Technology* 139, 99-110.
17. Horio, M., Nonaka, A., 1987. A generalized bubble diameter correlation for gas-solid fluidized beds. *A.I.Ch.E. Journal* 33, 1865.
18. Hrenya, C.M., Sinclair, J.L., 1997. Effects of particle-phase turbulence in gas-solid flows. *A.I.Ch.E. Journal* 43, 853-869.
19. Ishii, M., 1975. *Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow*. Eyrolles, Paris.
20. Kaneko, Y., Shiojima, T., Horio, M., 1999. DEM simulation of fluidized beds for gas-phased olefin polymerization. *Chemical Engineering Science* 54, 5809-5821.
21. Kobayashi, N., Yamazaki, R., Mori, S., 2000. A study on the behaviour of bubbles and solids in bubbling fluidized beds. *Powder Technology* 113, 327-344.
22. Leva, M.: *Fluidization* (McGraw-Hill, 1959).
23. Mori, S., Wen, C.Y., 1975. Estimation of Hubble diameter in gaseous fluidized beds. *A.I.Ch.E. Journal* 21, 109.
24. Pain, C.C., Mansoorzadeh, S., de Oliveira, C.R.E., 2001. A study of bubbling and slugging fluidised beds using the two-fluid granular temperature model. *International Journal of Multiphase Flow* 27, 527-551.
25. Sinclair, J.L., Jackson, R., 1989. Gas-particle flow in a vertical pipe with particle-particle interactions. *A.I.Ch.E. Journal* 35, 1473-1486.
26. Syamlal, M., O'Brien, T.J., 1989. Computer simulation of bubbles in a fluidized bed. *A.I.Ch.E. Symposium Series* 85, 22-31.
27. Wen, C.-Y., Yu, Y.H., 1966. *Mechanics of fluidization*. Chemical Engineering Progress Symposium Series 62, 100-111.

10. ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. *Distintos modos de contacto entre el lecho de partículas y el fluido: (a) Lecho fijo; (b) Lecho en comienzo de fluidización; (c) Lecho con fluidización no burbujeante; (d) Lecho con fluidización burbujeante; (e) Slugging con slugs axiales; (f) Slugging con slugs de pared; (g) Fluidización turbulenta; (h) Fluidización en fase dispersa con transporte neumático de partículas.*

Figura 2. *Ejemplos de intercambiadores de calor en lecho fluidizado: (a) Enfriamiento rápido de metales; (b) intercambio de calor indirecto entre gas y partículas; (c) Generación de vapor a partir de ceniza caliente.*

Figura 3. *Proceso Kunii-Kunugi.*

Figura 4. *Curva Pérdida de carga vs. Velocidad para sistemas sólidos-gas.*

Figura 5. *Variación de la esfericidad con la porosidad de las partículas.*

Figura 6. *Clasificación de las partículas según Geldart.*

Figura 7. *Un lecho fluido libre burbujeante y modos de coalescencia de burbujas.*

Figura 8. *Esquema del lecho bidimensional simulado.*

Figura 9. *Dibujo de la malla simulada.*

Figura 10. *Ampliación de la zona inferior de la malla simulada.*

Figura 11. *Imágenes del comportamiento de burbujas para distintos modelos.*

Figura 12. *Imagen explicativa de las ecuaciones.*

Figura 13. *Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 1 de Syamlal-O'Brien.*

Figura 14. *Análisis de la evolución del lecho durante el primer segundo de simulación para el caso 2 correspondiente al modelo de Syamlal-O'Brien.*

Figura 15. *Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 2 de Syamlal-O'Brien.*

Figura 16. *Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 3 de Syamlal-O'Brien.*

Figura 17. *Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 4 de Syamlal-O'Brien.*

Figura 18. *Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 5 de Gidaspow.*

Figura 19. *Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 6 de Gidaspow.*

Figura 20. Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 8 de Gidaspow.

Figura 21. Análisis de la evolución del lecho durante el primer segundo de simulación para el caso 8 correspondiente al modelo de Gidaspow.

Figura 22. Imagen del instante de tiempo de 10 segundos para el caso 8 de Gidaspow.

Tabla 1. Valores de porosidad para diferentes tipos y tamaños de partículas en régimen de mínima fluidización.

Tabla 2. Resultados empíricos de las constantes K_1 y K_2 .

Tabla 3. Resumen de los parámetros del modelo.

Tabla 4. Relaciones de velocidad y altura para los distintos modelos empleados.

Tabla 5. Resumen de las condiciones empleadas en cada caso.

Tabla 6. Resumen de las características de cada caso.

Gráfica 1. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 1.

Gráfica 2. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 1.

Gráfica 3. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 2.

Gráfica 4. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 2.

Gráfica 5. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 3.

Gráfica 6. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 3.

Gráfica 7. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 4.

Gráfica 8. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 4.

Gráfica 9. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 5.

Gráfica 10. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 5.

Gráfica 11. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 6.

Gráfica 12. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 6.

Gráfica 13. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 7.

Gráfica 14. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 7.

Gráfica 15. Diámetro de la burbuja vs. Altura del lecho para el caso 8.

Gráfica 16. Velocidad de la burbuja vs. Diámetro de la burbuja para el caso 8.

11. ANEXOS: Código MATLAB

```
clc, clear
tic
%%Main postprocessing file for tecplot export data
%%Carlos III University of Madrid - May 2009

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% The file name must be differentiated by a numerical index placed at
the
% end and before the file extension .dat

charfilename='casol';
charfileextension='_tec.dat';
initialfile=1000; %initial index of the files array to read (can be
0)
endfile=20000; %final index of the files array to read (can not be 0)
deltafile=10; %increment of the index from a file to the next (>0)
At=0.0005*deltafile;
nnodes=18072; % number of mesh nodes

nbuold=1; Xcbuold=1; Ycbuold=1;% initial value for storage data
VOFm=0; % Initial value for storage time averaged data

ntotfiles=round((endfile-initialfile)/deltafile)+1;
for nfile=1:ntotfiles, %this index goes from 1 to the total amount of
files

fileextension=initialfile+(nfile-1)*deltafile; %this index is the
actual index of the file name
charnumber=charnumbercreator_v1(fileextension); %transformation of the
file index into a char string
data = dlmread([charfilename charnumber charfileextension],',',4,0);

k=1;

for i=1:5:nnodes;
    x(i:i+4)=data(k,:);
    k=k+1;
end
x=x(1:nnodes);

for i=1:5:nnodes;
    y(i:i+4)=data(k,:);
    k=k+1;
end
y=y(1:nnodes);

for i=1:5:nnodes;
    vof(i:i+4)=data(k,:);
    k=k+1;
end
vof=vof(1:nnodes);

M=length(x);
```



```
% Generación y ordenación de los vectores x e y
k=0;
for m=1:M
    if y(m)==y(1)
        k=k+1;
        z(k)=x(m);
    end
end

j=0;
for m=1:M
    if x(m)==x(1)
        j=j+1;
        h(j)=y(m);
    end
end

xo=sort(z);
yo=sort(h);
n1=length(xo);
n2=length(yo);

f1=interp1(xo,[1:n1],x);
f2=interp1(yo,[1:n2],y);

for m=1:M
    k1=round(f1(m));
    k2=round(f2(m));
    xn(k1)=x(m);
    yn(k2)=y(m);
    VOF(k1,k2)=vof(m);
end

Clevel=0.3;
C=contour(xo,yo,VOF', [Clevel Clevel]); %Matlab 6.3
axis equal

nbur=1;
i=1;
Cmax=maxcalculator_v1(C);
Cmin=mincalculator_v1(C);
while i<size(C,2) %You'd better use the second row of C to detect
each contour
    xb=C(1,(i+1):(C(2,i)+i));
    yb=C(2,(i+1):(C(2,i)+i));
    Ymax(nbur)=max(yb); %maximum Y coordinate
    Ymin(nbur)=min(yb); %minimum Y coordinate
    if (Cmin<Ymin(nbur)) & (Ymax(nbur)<Cmax),
        C(3,i:(C(2,i)+i))=nbur;
        Abur(nbur)=polyarea(xb,yb); %bubble area
        Dbur(nbur)=sqrt(4*Abur(nbur)/pi); %equivalent bubble diameter
        [Xcbur(nbur),Ycbur(nbur)]=centrecalc_v1(xb,yb); %area centre
        nbur=nbur+1;
    elseif (abs(C(1,(C(2,i)+i))-C(1,i+1))==0.5) &
(((C(2,(C(2,i)+i))+C(2,i+1))/2)>0.2) % FB surface
        C(3,i:(C(2,i)+i))=0;
        xsup=xb; %coordinates of the FB surface
        ysup=yb;
```

```

        [Xmsup,Ymsup]=centrecalc_v1(xsup,ysup); %Ymsup=mean height of
the FB
        elseif (abs(C(1,(C(2,i)+i))-C(1,i+1))==0.5) & ((C(2,i+1))<0.1) %
contour at the bottom of the bed (not a bubble)
            C(3,i:(C(2,i)+i))=0;
            xinf=xb; %coordinates of the bottom contour
            yinf=yb;
            [Xminf,Yminf]=centrecalc_v1(xinf,yinf); %Ymsup=mean height of
the bottom contour
        end %end of if

        inci=C(2,i)+1;
        i=i+inci;

end %end for while

xsup(end+1)=0.5;
xsup(end+1)=0;
ysup(end+1)=2;
ysup(end+1)=2;

for i=(nburoid):(nbur+nburoid-2)
    DATA(i,1)=Abur(i-nburoid+1);
    DATA(i,2)=Dbur(i-nburoid+1);
    DATA(i,3)=Xcbur(i-nburoid+1);
    DATA(i,4)=Ycbur(i-nburoid+1);
    DATA(i,5)=nfile;
end
nburoid=nburoid+nbur-1;

VOFm=VOF+VOFm;

% Vectores reinicializados para no arrastrar error en sucesivas
% iteraciones
Xcbur=0;
Ycbur=0;
Abur=0;
Abur2=0;
Def=0;
Dbur=0;

(endfile-initialfile)/deltafile-nfile
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

end, %end of nfile for

VOFm=VOFm./nfile;

toc

coef1=0.4;coef2=0.2;
N=length(DATA);
for i=1:N
    for j=i+1:N,
        if DATA(j,5)==(DATA(i,5)+1);
            if sqrt((DATA(j,3)-DATA(i,3))^2+(DATA(j,4)-
DATA(i,4))^2)<(DATA(j,2)/2*coef1)
                if ((1-coef2)<(DATA(i,1)/DATA(j,1))) &&
((DATA(i,1)/DATA(j,1))<(1+coef2))

```

```

despx=DATA(j,3)-DATA(i,3);
despy=DATA(j,4)-DATA(i,4);
Ubur(i)=despx/At;
Vbur(i)=despy/At;
Xvec(i)=(DATA(i,3)+DATA(j,3))/2;
Yvec(i)=(DATA(i,4)+DATA(j,4))/2;
inst(i)=DATA(j,5);
if Vbur(i)>0
    DATA(j,6)=Vbur(i);
end
end
end
end
end

% Cálculo de diámetro de burbuja para intervalos de altura
t=1;
n=20; % Divisiones de altura
Ah=0.05; % Incremento de altura

for k=1:n
    for i=1:N
        ha=(k-1)*Ah;
        hb=(k)*Ah;
        if (ha<DATA(i,4)) && (DATA(i,4)<hb)
            Ybar(t,k)=DATA(i,4);
            Dburbar(t,k)=DATA(i,2);
            Defbar(t,k)=DATA(i,5);
            t=t+1;
        else
            Ybar(t,k)=0;
            Dburbar(t,k)=0;
            Defbar(t,k)=0;
        end
    end
end

lambda=9.86;
b=5*1e-3;
a=50*1e-2;
AT=a*b;
A0=AT/50;
g=9.8;
for i=1:n2
    Dteorico(i)=((8*(2^(3/4)-1)/lambda)^(2/3))*(((0.64-
(0.64/2))*(yo(i)+(lambda*A0)/(pi*(2^(3/4)-1)*b)))^(2/3))*(g^(-1/3)));
end
for k=1:n
    cont = 1;
    for i=1:length(Dburbar)
        if Dburbar(i,k) > 0.01
            Dbureqh(cont)=Dburbar(i,k);
            cont = cont+1;
        end
    end

    end
    Dbureq(k)=sum(Dbureqh)/cont;
end

```

```
STDbur(k)=std(Dbureqh);
Yeq(k)=((k-1)*Ah+k*Ah)/2;
Dbureqh=0;
clear cont;
end
figure (2)
plot(yo,Dteorico)
hold on
errorbar(Yeq,Dbureq,STDbur)
xlabel ('h (m)')
ylabel ('D (m)')
legend ('Theoretical diameter','Simulation data')

% Cálculo de velocidad de burbuja para intervalos de diámetro

n=20;
Ah=0.02;
N2=length(DATA);
t=1;
for k=1:n
    for i=1:N2
        ha=(k-1)*Ah;
        hb=(k)*Ah;
        if DATA(i,6)>0
            if (ha<DATA(i,2)) && (DATA(i,2)<hb)
                YbarV(t,k)=DATA(i,2);
                Velbur(t,k)=DATA(i,6);
                t=t+1;
            else
                YbarV(t,k)=0;
                Velbur(t,k)=0;
            end
        end
    end
end

for i=1:n2
    Velburteorico(i)=0.8*sqrt(Dteorico(i)*g);
end

for k=1:n
    cont2=1;
    for i=1:length(Velbur)
        if 0<Velbur(i,k)
            Velbureqh(cont2)=Velbur(i,k);
            cont2=cont2+1;
        end
    end
    Velbureq(k)=sum(Velbureqh)/cont2;
    STVel(k)=std(Velbureqh);
    YDeq(k)=((k-1)*Ah+k*Ah)/2;
    Velbureqh=0;
    clear cont2
end
```



```
figure (3)
errorbar(YDeq, Velbureq, STVel)
hold on
plot (Dteorico, 0.8*sqrt(Dteorico*9.8), 'r')
plot (Dteorico, 0.71*sqrt(Dteorico*9.8), 'g')
plot (Dteorico, 1*sqrt(Dteorico*9.8), 'k')
xlabel ('D (m)')
ylabel ('V (m/s)')
legend ('Simulation data', 'Theoretical velocity for \phi =
0.8', 'Theoretical velocity for \phi = 0.71', 'Theoretical velocity for
\phi = 1')
```

